博士論文 平成 19 年度 (2007)

UHF 帯 RFID インベントリの高性能化



慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科 川喜田 佑介

博士論文要旨

UHF 帯 RFID インベントリの高性能化

UHF 帯 RFID では、読み取り領域にある RF タグの目録の作成 (インベントリ) を確 実、高速に作成することが主要な研究課題であり、これを本研究の目的とする。本研究 は、RFID インベントリの確実化および高速化をそれぞれ実現する 2 つのサブテーマから なる。"サブテーマ 1: 現実的な環境下における RFID アンチコリジョンのための回線品 質"では、標準的な UHF 帯 RFID エアプロトコルの現実的な環境下における許容回線品 質とアンチコリジョン速度の関係を定量化し、その成果は UHF 帯 RFID システムの設置 設計に応用できる。UHF帯 RFIDは、他の RFIDや他のワイヤレスシステムと周波数帯 を共用しており、アンチコリジョン速度の深刻な低下をもたらさない干渉量の定量化は重 要である。このサブテーマでは、エラー回線を考慮した現実的環境下において、符号化方 式と干渉の種類を考慮し、RFID アンチコリジョンに許容できる回線品質について議論し た。許容回線品質の定量化は、プロトコルシミュレーションと数学的分析だけでなく、実 験的手法も用いた。これらの定量化では、フレーム ALOHA 方式の国際的な標準プロト コルをエアプロトコルとして選択した。本研究を行うにあたり、プロトコルシミュレータ を開発した。シミュレーション結果はポアソン分布に基づく分析値と比較した。分析は、 リターン (タグからリーダ) 回線とフォワード (リーダからタグ) 回線で別々に行った。プ ロトコルシミュレーションの結果、リターン回線、フォワード回線共に 64 個以下の RF タグを大幅な性能劣化を伴わずにアンチコリジョンするためにはパルスエラー率で 10-4 以上の回線品質を確保することが一般的に必要であると分かった。早急な読み取りを必要 としないアプリケーションを使用する場合は、リターン回線の品質は下げられる。しか し、フォワード回線の品質低下は、重要なコマンドの損失につながる恐れがある。干渉源 がリーダの場合では、リターン回線では最大 10dB 程度、フォワード回線では 5dB 程度要 求回線品質を緩和できることを実験的に測定した。"サブテーマ 2: キャプチャ効果を利用 する UHF 帯 RFID インベントリの高速化"では、RF タグからの電波強度のばらつきを効 率的に利用することでアンチコリジョンの高速化を可能とした。提案手法は、標準プロト

コルを用いて実装することができるため市販リーダへ容易に適用することができる。複数の RF タグからのアクセス要求が衝突しても電力差によりアクセスが成功することはキャプチャ効果と呼ばれており、本論文では、キャプチャ効果を有効利用する動的フレーム ALOHA により、UHF 帯 RFID インベントリを高速化する手法を提案する。従来キャプチャ効果を有効利用するためには RF タグの応答に関する電波伝搬モデルの構築が必要であったが、提案手法ではフレーム内での空スロット数、成功スロット数、衝突スロット数の関係から直接キャプチャの発生確率を推定する。さらに推定したキャプチャ確率を用いて、フレーム長を最適化することにより RFID インベントリを高速化する。プロトコルシミュレーションを用いて提案手法の推定精度と高速化効果の基本特性を明らかにした。提案手法により十分な精度でキャプチャの発生確率を推定できること、キャプチャの発生確率が高い場合に、高速化の効果が顕著であることを明らかとした。また高速化には、キャプチャ発生確率を考慮した読み残し RF タグ数の推定が大きく寄与していることも明らかとした。実機実装を用いた評価により提案手法が代表的な既存手法と比較して安定して高速に動作することを確認した。この効果は、電波反射や吸収がある現実的な環境で顕著となり、実測では平均的には 20% 弱の高速化を安定的に実現できることが明らかとなった。

キーワード:

1. RFID、2. 多元接続技術、3. 要求回線品質、4. RFID サイト設計、5. キャプチャ効果、6. 高速化 (容量増大)、7. 確実化

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科 川喜田 佑介

Abstract of doctoral thesis

High performance UHF-band RFID inventory

Reliability and reading speed are important research topics in UHF-band RFID inventory, which represents a process of cataloging RF tags in the reading area. This research comprised of the following two subthemes; the reliability and the acceleration of RFID inventory respectively. In "Subtheme 1: Permissible Link Quality for RFID Anti-Collision in a Practical Environment," the permissible link quality in a practical radio environment was quantified, and its result could be applied to RFID site designs. Since UHF RFID shares the frequency band with other RFID and/or other wireless systems, it is important to determine how much interference can be applied without causing a significant degradation of anti-collision speed. This strongly relates to the required separation distance between contending wireless systems. In this theme, the permissible link quality for RFID anti-collision in a practical environment was discussed by considering an erroneous communication link, taking into account of bit encoding and the type of interference. This research used the quantification of permissible link quality experimentally along with protocol simulations and the mathematical analyses. An international standard protocol, employing frame slotted ALOHA, was used as the air protocol. For these investigations, a protocol simulator was developed. The validity of the simulation was confirmed with analytical values based on Poisson distribution and an experiment. The investigation in the return (tag to reader) link, and the forward (reader to tag) link, were analyzed separately. As result of the protocol simulation, it was revealed that it is generally important to secure the Pulse Error Rate 10⁻⁴ or better in both return and forward links for the anti-collision of 64 or less tags without causing excessive anti-collision speed degradation. The quality of the return link may be relaxed when the application does not require a fast anti-collision. The degradation of the forward link, on the other hand, may entail loss of important commands, resulting in extremely slow anti-collision. It was measured experimentally that the required link quality could be relaxed by up to 10dB in the return links and by 5dB in the forward link when the primary source of interference originates in the interfering readers. In "Subtheme 2: Acceleration of UHF-band RFID Inventory Leveraging Capture Effect," the acceleration of the RFID inventory with the dynamic frame ALOHA was achieved leveraging the capture effect even without a priori knowledge of the radio propagation model. Capture effect represents the effect in which one of the radio packet can be successfully received when plural packets collides in a time slot because of the electric power difference. In the existing studies, the radio propagation model needs to be established before leveraging the capture effect. In this research, the capture occurrence was estimated directly using the observable numbers, i.e., the number of empty slots, success slots, and collision slots in an ALOHA frame. Moreover, the RFID inventory was accelerated by optimizing the frame length using the estimated capture occurrence. The fundamental performance of the proposed algorithm was verified using protocol simulations. The capture occurrence can be estimated accurately by the proposed technique and the effect of acceleration was significant when the capture occurrence was high. Moreover, it was clarified that the estimation method for the backlog number of RF tags considering the capture effect greatly contributes to the acceleration. The acceleration effect and stability of the proposed method was evaluated also with a commercial RFID reader. It was experimentally confirmed that the propose method excels existing dynamic framed ALOHA method by approximately 20%. The advantage is significant in the practical radio environment where there is large electrical power distribution on replies from RF tags.

Keywords:

1. RFID, 2. Anti-collision, 3. Permissible link quality, 4. RFID site design, 5. Capture effect, 6. Acceleration, 7. Ascertain

Keio University, Graduate School of Media and Governance Yuusuke Kawakita

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	2
1.2	研究課題	3
1.3	研究の目的	3
1.4	既存研究	4
1.5	研究の進め方	8
1.6	RFID サイト設計の定義	8
1.7	本論文の構成	9
第2章	現実的な環境下における RFID アンチコリジョンのための回線品質	10
2.1	序論	11
2.2	フレーム ALOHA プロトコルシミュレーション	11
2.3	許容回線品質分析	20
2.4	RFID サイト設計への応用	31
2.5	結論	34
第3章	キャプチャ効果を利用する UHF 帯 RFID インベントリの高速化	35
3.1	序論	36
3.2	提案	36
3.3	提案の基本特性	39
3.4	評価	45
3.5	結論	51
第 4 章	結論	52
参考文献		57
付緑 A	仲トライスフェージング環境における衝突 RF タグ数とキャプチャの関係	60

目次		vi
付録 B	実機実測によるフレーム状況記録	63
付録 C	RF タグによるリターン回線のパケットエラー率計測手法	66

記号表

 L_c フレームに含まれる衝突スロット数, 6

B 次フレームに残る RF タグ数, 6

 L_s フレームに含まれる成功スロット数, 6 L_e フレームに含まれる空スロット数, 6

L フレーム長, 6

Q フレーム長を指示するパラメータ、 2^Q がフレーム長 L と等しい, 12

PuER パルスエラー率, 14

 T_s 成功スロットの所要時間, 14 T_c 衝突スロットの所要時間, 14 空スロットの所要時間, 14

k 1 つのスロット内で応答する RF タグ数, 16

P(k) 1 つのスロット内で k 個の RF タグが応答する確率, 16 μ 1 つのスロットあたりの RF タグ応答数の期待値, 16

N 該当フレームでアンチコリジョン対象となる RF タグ数, 16 N_0 インベントリ開始時のアンチコリジョン対象 RF タグ数, 17

 P_c スロット内で RF タグ応答が衝突してもキャプチャとなる確率, 37

T_P 該当フレームでのスループット、37

図目次

1.1	研究のロードマップ	4
2.1	フレーム ALOHA によるアンチコリジョン例..............	11
2.2	RF タグの状態遷移概念図	13
2.3	プロトコルシミュレータの構成	14
2.4	符号化スキームのビット表現	15
2.5	アンチコリジョン所要時間のシミュレーション値と分析値の比較 (RF タ	
	グ数 = 32)	18
2.6	QueryRep コマンドと RN16 応答の実行数 (RF タグ数=32, PuER=0)	19
2.7	RN16 衝突数 (RF タグ数=32, PuER=0)	19
2.8	エラーありリターン回線におけるアンチコリジョン所要時間のシミュ	
	レーション値	20
2.9	32 個の RF タグのアンチコリジョン所要時間のシミュレーション値	21
2.10	エラーありフォワード回線におけるアンチコリジョン所要時間のシミュ	
	レーション値	22
2.11	エラーありフォワード回線における 64 個の RF タグのアンチコリジョン	
	所要時間のヒストグラム	23
2.12	エラーありフォワード回線における 64 個の RF タグのアンチコリジョン	
	所要時間の累積ヒストグラム	24
2.13	各 PuER における要求 CNR	25
2.14	リーダスペクトラムのキャリア成分	26
2.15	リターン回線の実験装置概略図	
2.16	タグエミュレータ (BAP)	
2.17	パケットエラー率 PER とパルスエラー率 PuER の関係 (RN16/Query)	28
2.18	リターン回線の PER カーブ	29
2.19	フォワード回線の実験装置概略図	30
 , 1 /		50

図目次 ix

2.20	フォワード回線の PER カーブ	30
2.21	サイト設計における RFID リーダの配置概略図	33
3.1	既存手法と提案手法のフローチャートの比較	38
3.2	提案手法による、 1 フレーム実行後のキャプチャ率 Pc 推定精度評価	39
3.3	提案手法および Pc を考慮しない既存手法による、キャプチャ環境下で 1	
	フレーム実行後の応答期待値 μ 推定精度 $\dots\dots$	40
3.4	キャプチャ率 $P_c=0$ 環境下における、提案手法と既存手法によるアンチ	
	コリジョン所要スロット数の比較	42
3.5	キャプチャ率 $P_c=0.5$ 環境下における、提案手法と既存手法によるアン	
	チコリジョン所要スロット数の比較	43
3.6	キャプチャ率 $P_c=1.0$ 環境下における、提案手法と既存手法によるアン	
	チコリジョン所要スロット数の比較	44
3.7	キャプチャ率 $P_c=0.5$ 環境下における、提案手法と提案手法の部分実装	
	のアンチコリジョン所要スロットの比較	44
3.8	キャプチャ率実測の実験装置概略図	45
3.9	実測したキャプチャ率と希望干渉比の関係	46
3.10	高速化実測の実験装置概略図....................................	47
3.11	実験装置の配置図	47
3.12	暗室内でのアンチコリジョン所要スロットの比較	49
3.13	1 反射面環境下でのアンチコリジョン所要スロットの比較	50
3.14	正規化した実測応答分布の比較	50
A.1	正規化した RF タグからの受信電力の確率密度関数 (PDF) と累積分布関	<i>c</i> 1
	数 (CDF) の例	61
A.2	2 つ以上の干渉波パケットが希望波のパケットに衝突する場合の PDF お	
	よび CDF のグラフ. 正規化した RF タグからの受信電力の確率密度関数	<i>(</i> 2
	(PDF) と累積分布関数 (CDF)	62
C.1	C1G2 プロトコルの RN16 パケットに関するタイムスペースチャート.	
	(a) RN16 が正常に受信された場合 (b) RN16 がリターン回線でパケット	
	エラーになる場合	67
C.2	リターン回線のパケットエラー率計測の装置概略図	68

表目次

2.1	シミュレーションと分析で使用したパラメータ	16
2.2	リターン回線の実験パラメータ	27
2.3	サイト設計アプリケーションのパラメータ	32
B.1	フレーム状況記録の凡例	63

第1章

序論

UHF 帯 RFID における代表的な研究課題について産業界の要求と既存技術を中心に整理検討し、研究の目的を示す。また、研究のロードマップを明らかにし、研究課題に本研究でどのように取り組んだかを述べる。

1.1 研究の背景

10m 以内の距離での複数の対象物の自動認識を必要をする場合、低コストタグで長距離 読み取り可能な UHF 帯のパッシブ RFID (Radio Frequency IDentification) が選択肢に挙 がる。UHF 帯 RFID は SCM (Supply Chain Management) への応用が起点 [1] となり技術 革新や標準化が進み、パレットやクレートの回収型梱包材管理 [2]、消費生活用製品のラ イフサイクル情報管理 [3]、航空機業界の保守整備情報管理 [4] 等の分野へ適用が拡大し ている。

RFID は、無線通信を用いた非接触個体認識技術の一種である。RFID システムは、識別子などの情報を記録する RF タグと、RF タグから情報を読み書きする RFID リーダから構成される。RFID システムの規格は数多く存在する [5] が、近年注目されているのは UHF 帯 RFID である。著者らは当時日本国内で現実的に使用可能であった HF 帯 RFID システムを用いた可読率調査について報告 [6] しているが、複数読み取りを行わなくても可読率を 100% にするのは困難であった。その後登場した UHF 帯 RFID システムは、その読み取り範囲が従来の RFID と比較して広範囲 (数 m 程度) に及ぶ特性から、SCM における検品業務など多数の物品を一括、高速読み取りを実現する技術として期待されている。

UHF 帯の RFID の規格として、EPCglobal Class 1 Generation 2 UHF Air Interface (C1G2) プロトコル [7] があり、以下の特徴から事実上の標準規格となっている。

- 互換性 世界各国での利用を想定し、860-960MHz という広い周波数帯域で動作する。また、複数のベンダから供給される RFID リーダ、RF タグが本規格に準拠する事で、ベンダ間の互換性も実現している。
- 低価格 インレイ価格で数円という消費財個品管理を目標とした低価格タグコストを目指している。
- オープン性 知的財産権を他のベンダに対して Royalty free あるいは「非差別かつ合理的なライセンス料金で」(Reasonable And Non-Discriminatory、RAND と呼ぶ) 使用許諾を与えることが標準化のプロセスで定められている。
- 高性能 物流現場での運用を想定した高速・大量読み取りを行える仕様になっている。

1.2 研究課題

通常 UHF 帯 RFID は、近接 RFID 機器などの他の無線機器と帯域を共用しており、通信回線は干渉やノイズにさらされる対象となると想定したほうが安全である。ここで言う通信回線とは、リーダからタグへのフォワード回線とタグからリーダへのリターン回線の両方を意味する。複数読み取り性能に致命的な性能低下を及ぼさない範囲でどの程度ノイズや干渉を受け入れられるかを定量化することは、興味のもたれている事項である。リターン回線は、日本国の電波法等でのキャリアセンス義務により保護される。しかし、フォワード回線の品質は、RFID システム設置設計 (サイト設計) [8,9] に依存する。RFID サイト設計の失敗により十分な回線品質を得られない場合、タグが読まれないか、読み取り速度が著しく低下する [10]。それゆえ RFID サイト設計の視点から、対象とするタグ数や要求読み取り速度などの、運用要求に基づく許容回線品質の指針が必要である。

UHF 帯 RFID は、RF タグを貼付した物品をパレット上に積載したフォークリフトが、リーダおよびアンテナで構成したゲートを通過する際に RF タグの情報を読み取る形式や、ハンディ型のリーダで、比較的近接した範囲にある RF タグの情報を読み取る形式で用いられる。このため、操作性の観点、複数読み取りによる読みもらし防止の観点からも、読み取り領域にある RF タグの目録の作成 (インベントリ) を高速作成する多元接続制御技術 (アンチコリジョン) が重要である。

1.3 研究の目的

UHF 帯 RFID を高性能化するための主要な研究課題は以下の 2 点に集約でき、これを本研究の目的とする。

- 1. RFID 読み取りの確実化
 - 干渉やノイズによる RFID 読み取り不能、または速度の著しい低下となる要因の分析を行い、RFID 読み取りを確実にする。
- 2. RFID 読み取りの高速化 RFID のインベントリに利用されるアンチコリジョンを高速化する。
- これらの研究課題を、それぞれ、以下のサブテーマとして議論する。
 - 1. 現実的な環境下における RFID アンチコリジョンのための回線品質

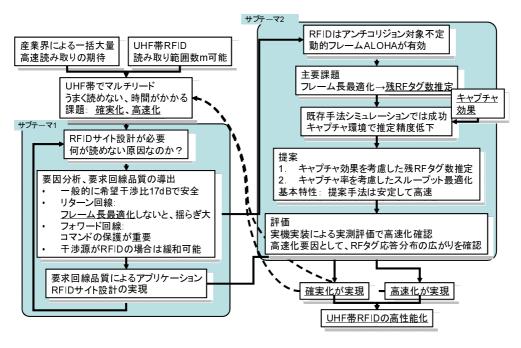


図 1.1 研究のロードマップ.

2. キャプチャ効果を利用する UHF 帯 RFID インベントリの高速化

研究全体のロードマップとして、それぞれのサブテーマの構成と関係を図 1.1 に示す。

1.4 既存研究

本研究で扱う主要な研究課題である確実化および高速化に関する既存研究をまとめる。

1.4.1 確実化に関係するもの

RFID の複数読み取りは、一般的な無線通信の多元接続制御技術 (アンチコリジョン) に基づいている。Hush[11] は、Capetanakis[12] が報告したツリーアルゴリズムに基づく RFID システムのアンチコリジョン速度について分析を行っている。Vogt[13] は、タグ数 が占有スロット数と衝突スロット数の和によって表現可能であるとみなした動的 ALOHA 方式について調査している。Zhen[14] は、キャプチャ効果を考慮し、フェージング環境に おけるパッシブおよびアクティブ RFID システムの読み取り時間分析について報告している。Floerkemeier[15] は、フレーム ALOHA 方式におけるフレームサイズ選択の最適化を 試みる 4 つの異なる伝送方式について比較し、議論した。Wille[16] は、エラー回線上の フレームサイズ最適選択に注目したアンチコリジョン性能について報告した。著者ら [17]

は、本論文の第 2.2 節で述べる RFID アンチコリジョンの回線品質に関して、ビット符号 化とエラー回線を考慮した RFID アンチコリジョン性能プロトコルシミュレーションにつ いて報告している。

これらの文献の多くは、RFID 複数読み取り性能の確認または最適化をエラーなし回線を用いて行っている。文献 [16] でも、ビット符号化と干渉の種類については考慮されていない。しかし、現実的な状況では、ノイズや他の無線機器からの干渉は存在する。また、貼付対象物の誘電率や相互インピーダンスによる信号品質の劣化 [18] により、タグアンテナ性能も悪化する恐れがある。それゆえ、RFID サイト設計の視点から、対象とするタグ数や要求読み取り速度などの、運用要求に基づく許容回線品質の指針が必要である。

確実化に関係する研究課題は要求条件導出等の分析を基本とし、最終的な応用としてはサイト設計の実現が考えられる。しかし、ここで挙げた主要な既存文献ではサイト設計に使用できる要求回線品質等の要求条件の導出は行われていない。サイト設計の実現を目指すものは、伝統的にはテストサイトを構築した上でカットアンドトライ (測定と調整を繰り返す手法) によるものが多い。カットアンドトライのコスト低減を目指して、自動計測技術が提案されている。たとえば、RF 夕グ位置とインベントリの可否を同時に記録することにより、読み取り範囲計測の省力化する提案 [19] などが挙げられる。三次ら [20] は、UHF 帯 RFID の読み取り率低下の原因となるマルチパスフェージングに関して、RF 夕グ位置での受信電力プロファイルを測定するだけでパスを発見できる手法を提案している。これにより、マルチパスの原因となる壁や床天井を解析的に同定でき、効率的な電波吸収体の貼付が可能となる。また、読み取り範囲内でパッシブ動作する事が出来ない状態でも無線プロトコルやセンサー情報の記録を行える電池つきパッシブタグ (battery assisted passive tag, BAP 夕グ) [21] による読み取り測定も行われている。パケットの損失などによりプロトコル上の遷移が中断しても記録が可能であるので、パケットエラー率測定 (付録 C) 等に利用できる。

カットアンドトライでは、試行錯誤の結果を数値化しにくいため、要求条件を導出する必要がある。特に干渉に対する影響を考慮するためには要求回線品質導出が必要であり、これについては本研究で議論する。RFID では見通し通信が存在する電波伝搬モデルが想定されるがこれについても実測で調査をした例が無いので調査する。

1.4.2 高速化に関係するもの

RFID におけるアンチコリジョンは、フレーム ALOHA 方式に代表される確率論的手法 とバイナリツリー方式に代表される決定論的手法に分類できる [5] が、本論文では UHF 帯 RFID の代表的な無線通信プロトコルで用いられているフレーム ALOHA 方式に絞ってその高速化について議論する。

フレーム ALOHA 方式の高速化にはフレーム長を RF タグの数に応じて動的に変化させる動的フレーム ALOHA 方式が有効である。動的フレーム ALOHA 方式では、リーダにとって観測可能な数を用いて、解析的に次フレームの残 RF タグ数を推定することが主要な技術課題である。たとえば Schoute[22] は、無線通信一般の動的フレーム ALOHA において、パケットの発生をポアソン分布とみなし、衝突するノード数と衝突確率の期待値からフレーム内で衝突しアクセスに失敗する残ノード数 B は 衝突スロット数 L_c を用いて式 (1.1) で表せるとしている。

$$B = 2.39 \cdot L_C \tag{1.1}$$

この考え方はノードを RF タグと置き換える (残 RF タグ数 B とする) ことで容易に RFID のアンチコリジョンにも適用できる。

Vogt[13] は推定残 RF タグ数の下限値として式 (1.2) を用いている。

$$B = 2 \cdot L_C \tag{1.2}$$

Chen[23] は、RF タグからのアクセス要求を二項分布としフレーム内の読み取り成功スロット数 L_s 、空スロット数 L_e 、衝突スロット数 L_C の期待値を求め、それらの観測量 (以降、フレーム状況とする) から式 (1.3) を推定残 RF タグ数として導出している。ただし、L はフレーム長とする。

$$B = (L - L_E - 1)\frac{L_S}{L_E} \tag{1.3}$$

著者ら [24] はポアソン分布を想定した式 (1.4) を用いるとともに国際標準プロトコルの 制約を考慮した評価を報告している。

$$B = L\frac{L_S}{L_F} - L_S \tag{1.4}$$

これらの従来手法はフレーム内のスロットを (a) 空スロット、(b) 成功スロット、(c) 衝突スロットの 3 種に分類することおよび、キャプチャ効果 [25, 26, 27] を考慮していないという点で共通である。

ここで、RFID のフレーム ALOHA と一般の無線アクセスのそれとの違いについてまとめる。RFID では、フレーム内で衝突しアクセスに失敗する RF タグのみが次フレームのアンチコリジョン対象となる。一方、フレーム ALOHA を用いる一般の無線アクセスでは、フレーム内で衝突しアクセスに失敗するノードに加えて、アクセス成功したノードも次フレームのアンチコリジョン対象となる。これらの関係を次フレームのアンチコリジョン対象ノード (RF タグ) 数を N_n とすれば、式 (1.5) で表せる。

$$N_n = \left\{ egin{array}{ll} B, & ext{RFID} \, \mathfrak{O}$$
場合 $B + L_S, & - \Re \mathfrak{O}$ 無線通信の場合 $\end{array}
ight. \eqno(1.5)$

本論文は RFID に絞った定式化を行うが、後述する定式化段階を式 (1.5) の関係を用いて 一部変更することで提案手法を一般の無線アクセスにも応用できる。

一方、著者らの実測によれば [28]、ある条件下では RF タグの応答が衝突したスロット の 50% がキャプチャによって読み取りが可能になることがわかっている。そこで UHF 帯 RFID において高速アンチコリジョンを実現する上ではキャプチャ効果を有効利用できないかと考えた。

キャプチャ効果を考慮したフレーム ALOHA 方式の高速化 (容量増大効果) についてはたとえば [25, 26, 27] で提案されているが、いずれの手法においても電波伝搬モデルを含め、リーダの受信電力が統計的にモデル化できているという前提に基づいている。UHF 帯 RFID におけるフェージングモデルは LOS(Line of sight) である仲上ライスモデルが適用可能とは考えられるもののライス係数はインスタレーション毎に異なるため、これらの手法をそのまま適用することは難しい。著者ら [29] は、本論文の第 3.2 節で述べるキャプチャ効果を利用する UHF 帯 RFID の高速化手法の基礎検討についてプロトコルシミュレーションを行い、報告している。

これらの動的フレーム ALOHA の改良とキャプチャ効果の利用は、リーダアルゴリズムを改良するか事前の測定を行うことにより、既に流通している RF タグにはなんら改変を加えなくてよい点で優位性がある。高速化のためにプロトコル改変する提案も見受けられる。亀田 [30] は、タグ存在確認を行うランダムアクセス試行に 1 ビットのフラグを用いることで通信に要する情報量を最小化し、ID 識別処理の高速化を図った。このようなプロトコルの改変には、RFID リーダばかりか、すでに流通している RF タグ自体を改変する必要がある。

RF タグ応答の衝突検出精度を向上する技術も提案されている。仮に RFID リーダが衝突スロット (応答数 2 以上) を検出できず、空スロット (応答数 0) として判定した場合、動的フレーム ALOHA 方式に残 RF 数推定プロセスに深刻な誤りを及ぼす恐れがある。肥

塚ら [31] は、RF タグからの応答速度にバラツキに注目し、その検出精度を向上する提案を行った。

長距離化による接触機会向上を目指す技術も提案されている。個々の RF タグがより長い時間途切れなく読み取り範囲に留まる事で読み取り機会を増加し、結果的に速度の向上を目指す技術である。この技術の実現には、第二搬送波の利用により不感領域を消す手法[32,33] や BAP タグ [21] による内部状態保存により電力不足を解消する手法がある。

1.5 研究の進め方

本研究は、技術開発を行うのみならず、研究成果の社会への応用までをめざし、以下の段階を踏んで研究を実施した。はじめに問題発見段階として、既存技術や産業界のニーズを調査分析することで研究課題を整理した。選択した研究課題について、手法の提案や分析を行うことで理論構築を行い、その効果を図った。効果が認められる場合は、机上計算やシミュレーションにより、提案の基本性能を調査した。必要に応じシミュレータ等を開発した。次にラボテスト段階として、実際のRFタグやRFIDリーダを実装した。RFIDリーダやRFタグを任意のアルゴリズムでプログラムするためにICE(in-circuit emulatior)を使用した。また、この際法令遵守の観点から、高周波ケーブルによる回線接続を行うか、電波暗箱や電波暗室を利用した。研究の成果は論文投稿するのみならず、実証実験を行い確認した。実証実験として、NetWorld+Interop Tokyo 2004(15万人の来場者を対象にしたRFIDイベント支援サービスの提供[6])、WIDEプロジェクトの研究会(プログラム運営委員支援システム[34])、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスのオープンキャンパスイベントであるOpen Research Forumに関してはORF2004(イベントでのUHF国内初利用、ORFActivity Score)、ORF2005(UHF/HFデュアル、名刺レス、研究情報提供サービス)、ORF2006(マルチコード実証実験) など多数実施した。

1.6 RFID サイト設計の定義

RFID を運用する環境 (RFID サイト) を構築する際は、ノイズや干渉によって読み取り速度の著しい低下を避け、対象とする RF タグ数や要求読み取り速度などの、運用要求に基づく設計指針が必要である。RFID サイト設計については、[8,9,10] などで既に議論されている。広義のサイト設計では、タグ感度、個装への貼付タグ特性、電波伝搬環境 (干渉源距離、フェージング環境、ボアサイト方向やアンテナパターンのようなアンテナ配

置)、運用 (コンベア速度、パレット搭載量) 等のパラメータを設計する必要がある。これらパラメータは相互に関係するが、その多くは要求回線品質をもとに議論可能である。そこで本研究では、RFID サイト設計をさまざまなパラメータに応用可能なパラメータである要求回線品質を用いた許容干渉源距離の導出と定義する。

1.7 本論文の構成

本論文は、序論、2 つのサブテーマについて論じた第 2,3 章、結論の全 4 章からなる。第 2 章において、現実的な環境下における RFID アンチコリジョンのための回線品質を導出し、解析的な RFID サイト設計を実現する。第 3 章において、キャプチャ効果を利用する UHF 帯 RFID インベントリの高速化を提案する。第 4 章において、本論文の結論を述べる。

第2章

現実的な環境下における RFID アンチコリジョンのための回 線品質

UHF 帯 RFID は、自動個体認識分野で重要な関心を集めている。 UHF 帯 RFID は、通常他の RFID や他のワイヤレスシステムと周波数帯を共用してお り、アンチコリジョン速度の深刻な低下をもたらす干渉量の定量化が重要な研 究課題といえる。本サブテーマでは、エラー回線を考慮した現実的環境下にお いて、符号化方式と干渉の種類を考慮し、RFID アンチコリジョンに許容でき る回線品質について議論した。許容回線品質の定量化は、プロトコルシミュ レーションと数学的分析だけでなく、実験的手法も用いて行った。これらの定 量化では、フレーム ALOHA 方式の国際的な標準プロトコルをエアプロトコ ルとして選択した。これらの調査のため、プロトコルシミュレータを開発し た。シミュレーション結果は、RF タグのフレーム内のスロット選択を一様分 布とした分析値と比較した。パケットエラー率やビットエラー率という指標の みならず希望干渉比という実際の現場で使用できる単位によってこれを導出し た点で実用的である。許容回線品質の定量化は、プロトコルシミュレーション と数学的分析だけでなく、実験的手法も用いた。さらに、現実的な干渉源の種 類として近接 RFID システムを想定した。導出した回線品質を用いて RFID サ イト設計を行う応用例を提供し、代表的な5つのシナリオを示し、それらの干 渉源許容距離を示した。

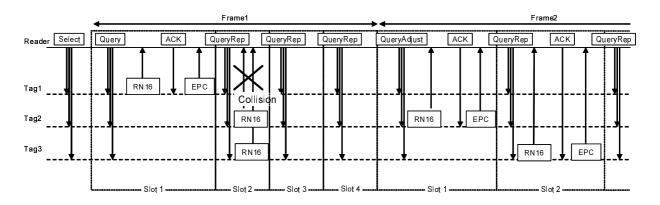


図 2.1 フレーム ALOHA によるアンチコリジョン例.

2.1 序論

本サブテーマでは、プロトコルシミュレーションのみならず実験的手法も用いて、エラー回線環境における RFID アンチコリジョンのための許容回線品質について議論する。

第 2.2 節において、UHF 帯パッシブ RFID プロトコルのシミュレーションについて述べる。実装したプロトコルとして、アンチコリジョンにフレーム ALOHA を用いるEPCglobal Class 1 Generation 2 protocol[7] (以降、C1G2 エアプロトコルとする。同仕様は ISO/IEC 18000-6 Amendment 1 TYPE C でもある)を選択した。開発したプロトコルシミュレータの詳細についても述べる。第 2.3 節において、シミュレーション結果について報告する。許容回線品質の評価は、リターン回線とフォワード回線で分けて調査した。プロトコルシミュレーションでは許容パルスエラーしか導出できないため、希望干渉比DUR による許容干渉量を明らかにする実験を行った。第 2.4 節において、提示した分析結果の使用例である RFID サイト設計のアプリケーションを提供した。最後に、第 2.5 節において、サブテーマの結論を述べる。

2.2 フレーム ALOHA プロトコルシミュレーション

ここでは、C1G2 エアプロトコルのアンチコリジョンおよび開発したプロトコルシミュレータについて述べる。シミュレータの基本性能を示すため、シミュレーションで得られた結果を、回線上のエラーを考慮して RF タグのフレーム内スロット選択を一様分布としてもとめた分析値と比較する。

2.2.1 アンチコリジョンプロトコル概要

フレーム ALOHA によるアンチコリジョン例 (RF タグ数 = 3、フレーム長 = 4) を図 2.1 に示す。この図は C1G2 エアプロトコル [7] の例だが、基本的な概念は一般的なフレーム ALOHA プロトコルにも適用可能である。アンチコリジョン手順は、以下の通り:

- 1. RFID リーダは、ビットマスクを用いて、指定されたタググループを選択するため の Select コマンドを送信する。
- 2. RFID リーダは、フレーム長を指定する Q 値 (2^Q がフレーム長 L と等しい。図 2.1 では、Q=2) を含む Query コマンドを送信する。
- 3. フレームが開始され、それぞれのタグは乱数発生器を用いてフレーム内のスロットを選択する。同時に、RF タグは、RF タグ自身を識別する 16 ビットの乱数メッセージ (RN16) を作成する。もし、RF タグのスロットカウントが 0 に到達した場合、この RN16 が応答される。
- 4. Query コマンド送信後、RFID リーダは RF タグ内部のスロットカウントを減算させる QueryRep コマンドを送信する。この場合も、タグのスロットカウントが 0 に到達した際に、この RN16 が応答される。

Query および QueryRep コマンド送信後、RFID リーダの対応は以下のうち 1 つ:

- (a) スロット内で1つの RF タグが応答した場合 (成功)、RFID リーダは、RF タグのスロット占有を承認するため、その RF タグの RN16 を含む Ack コマンドを送信する。承認された RF タグは、Electronic Product Code (EPC: 一意 ID)を送信する。EPC の送信に成功した RF タグは、アンチコリジョン処理が終了するまでコマンドに応答しない。
- (b) スロット内で複数の RF タグが応答した場合 (衝突)、RFID リーダは、衝突してしまった RN16 を単一の RN16 として承認しようとするか、RN16 のプリアンブル検出に失敗する。
- (c) スロット内で RF タグが 1 つも応答しない場合 (空)、RFID リーダは、どのコマンドも送信しない。
- 5. RFID リーダは、QueryRep コマンドの送信をスロットを進行するために繰り返す。 フレーム内の全てのスロットが終了した際、RFID リーダは QueryAdjust コマンド を送信し、次のフレームを開始する。この際、EPC 送信が完了していない RF タグ のスロットカウントは再設定される。

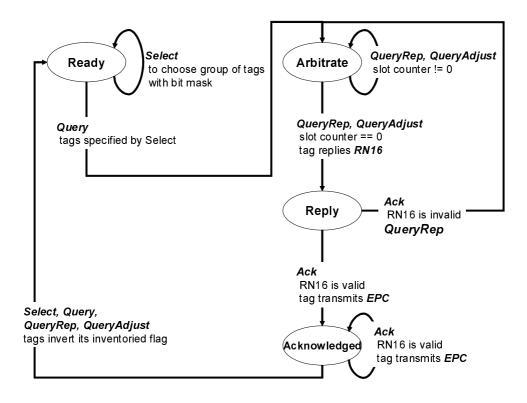


図 2.2 RF タグの状態遷移概念図.

- 6. RFID リーダは、全てのタグが EPC を送信するまでフレームを繰り返す。
- 7. RFID リーダは、アンチコリジョン手続きの速度向上を図るフレーム長調整のため、QueryAdjust コマンドを送信する。

図 2.2 は、C1G2[7] における RF タグの状態遷移の概念図である。RF タグが読み取り範囲に進入すると、RF タグは Ready 状態に遷移する。Select コマンドで指定された RF タグは、Query コマンドを受信して Arbitrate 状態に遷移する。RF タグのスロットカウントが 0 に到達した場合、RF タグは RN16 を応答し Reply 状態に遷移する。もし Reply 状態にある RF タグが正常な Ack コマンドを受信すれば、その RF タグは Acknowledged 状態に遷移し、RFID リーダによるメモリ読み取りや書き込みがされる (RF タグは個体認識された状態)。個体認識された RF タグは、次のコマンド (Select、Query、QueryRep、QueryAdjust のいずれか)を受信した際に、インベントリフラグを反転し Ready 状態に戻る。RFID リーダが EPC パケットの受信に失敗した際は、RFID リーダは、パケットを破棄するか、EPC を再度要求するために Ack を再送する。廃棄の場合は、RF タグは次のコマンド (Select、Query、QueryRep、QueryAdjust のいずれか)を受信した際に、Ready 状態に戻る。Ack 再送の場合は、Acknowledged 状態に留まる。

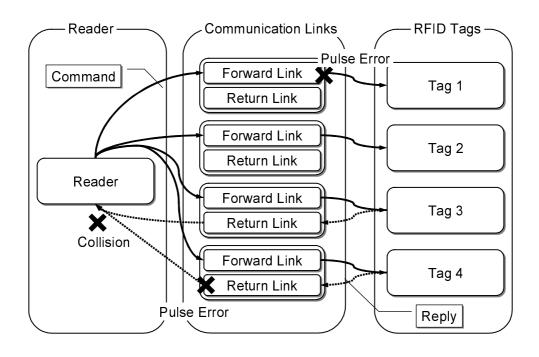


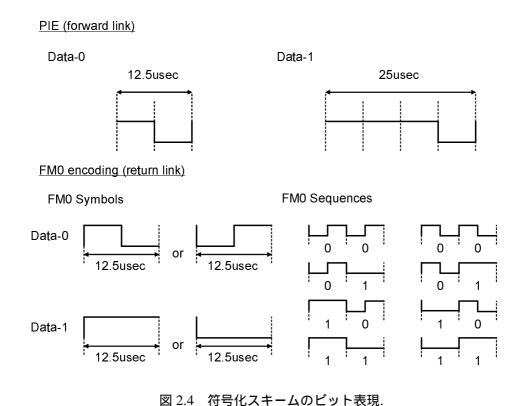
図 2.3 プロトコルシミュレータの構成.

2.2.2 RFID プロトコルシミュレータ

エラー回線上のプロトコル挙動を調査するため、プロトコルシミュレータ (EPCSim) を開発した。RFID システムを RFID リーダ、RF タグ、フォワード回線、リターン回線として再現できる (図 2.3 参照)。

シミュレーションでは、フォワード回線とリターン回線はそれぞれ PIE(Pulse Interval Encoding) と FMO 符号を使用する。シミュレーションで使用するビットとパルスの関係を図 2.4 に示す。FMO のビット境界は固定されているが、PIE ではデータが 0 か 1 かに依存する。それゆえ、ランダムエラーはビットよりもパルスに適用される。よって、エラー率は、パルスエラー率 (Pulse Error Rate, PuER) で表現される。

シミュレーションと分析で使用したパラメータを表 2.1 に示す。ここで、 T_s 、 T_c および T_e は、それぞれ成功、衝突および空の場合のスロットの所要時間と定義する。それぞれの スロットの所要時間は、市販されている RFID リーダを動作して計測したものである。これらの所要時間の違いは、全アンチコリジョン所要時間に影響する。本サブテーマの目的 は許容回線品質を導出することにあり、RF タグ数推定が適切に動作しない場合の変動を



除くため、フレーム長はアンチコリジョン手続き中は不変である (この数は、文献 [14] の 静的フレーム長として参照できる)。また、読み取り範囲内の RF タグ数が 64 個以上必要

となるアプリケーションのための許容回線品質を求める場合でも、本稿で示す手順は容易

に適用可能である。

シミュレーションでは、Select もしくは Query コマンドの受信時にパケットエラーが起こると、RF タグは、図 2.2 の Ready 状態に留まるため、アンチコリジョン手順に参加できず、次の Select と Query コマンドを正常に受信するまで個体認識されない。それゆえ、フォワード回線にエラーを適用する場合、それぞれの試行条件でアンチコリジョン所要時間が 1000msec に到達した際にシミュレーション打ち切った。1000msec は 64 個のRF タグをアンチコリジョンするのに十分に長い時間である。RN16 の受信時にパケットエラーが起こると、パケットは複数が重複した RN16 となるか、プリアンブルエラーとなる。第 2.2.1 項の手順 4.b で説明した重複 RN16 の場合は、RFID リーダは重複 RN16を含む Ack を送り、どの RF タグからも Ack の応答はない。プリアンブルエラーの場合は、RFID リーダはパケットを無視し QueryRep コマンドにより手続きが次のスロットへ進む。どちらの場合でも、RF タグは図 2.2 の Arbitrate 状態に遷移する。EPC の受信時に

Forward Link Speed	(k bps)	80
Return Link Speed	(k bps)	80
Length of PIE Data-0 (forward link)	(µ sec)	12.5
Length of PIE Data-1 (forward link)	(µ sec)	25.0
Length of FM0 Symbols (return link)	(µ sec)	12.5
T_s	$(\mu \text{ sec})$	2587.5
T_c	$(\mu \text{ sec})$	462.5
T_e	$(\mu \text{ sec})$	525
Q		4, 5, 6, 7, 8
Maximum Instantaneous Number of Tags		64

表 2.1 シミュレーションと分析で使用したパラメータ.

パケットエラーが起こると、パケットは破棄される。RF タグは、図 2.2 の Ready 状態に 遷移する。

2.2.3 シミュレータの基本性能

ここでは、RF タグのスロット選択を一様分布とする分析値とシミュレーションを比較して、シミュレータの機能性能を示す。アンチコリジョン所要時間の構造についても分析する。

アンチコリジョン所要時間の分析

RF タグ応答が一様分布となる基本的なスロット ALOHA 分析 ([12, 15]) を前提とし、 先に示した手順 4 により、成功、衝突、空になるコマンドの所要時間を計算する。1 つの スロットを k 個の RF タグが選択する確率 P(k) は、式 (2.1) で表現できる。

$$P(k) = \frac{(\mu)^k}{k!} e^{-\mu} \tag{2.1}$$

ここで、 μ は、応答する RF タグの期待値 (以降、応答期待値とする) を表し、 μ は N/L で表現できる。 N は、このフレームまでに EPC を送信していない残 RF タグ数であり、L は、フレーム長である。

成功、つまり、1 つの RF タグがスロットを占有できる確率 P(1) は、式 (2.2) で表現できる。

$$P(1) = \mu e^{-\mu} (2.2)$$

空、つまり、どの RF タグもスロットを選択しない確率 P(0) は、式 (2.3) で表現できる。

$$P(0) = e^{-\mu} (2.3)$$

衝突となる確率は、1 から成功スロットの確率および空スロットの確率の場合を引いた式(2.4) である。

$$P_{Collision} = 1 - P(0) - P(1) = 1 - e^{-\mu} - \mu e^{-\mu}$$
 (2.4)

始めのフレーム以降、RF タグの残数は P(1) に従って減少していく。インベントリ開始時のアンチコリジョン対象 RF タグ数を N_0 とすれば、始めのフレームのタグの残数 N_1 は式 (2.5) で表現できる。

この式 (2.5) は、漸化式 (2.6) に一般化できる。

$$N_i = N_{i-1} - LP_i(1) (2.6)$$

漸化式 (2.6) により、i フレーム目の残タグ数 $P_i(1)$ が表現できる。 $P_i(1)$ が 1 未満になった場合、残タグ数を 1 個とみなして、フレームの半分を足したものを分析値によるアンチコリジョンの終了とみなした。アンチコリジョンの所要時間は、式 (2.2-2.6) および、それぞれの場合のスロット所要時間 T_s 、 T_c 、 T_e を用いて計算した。

シミュレーションと分析値の比較

本稿では、アンチコリジョンを完了する時間をアンチコリジョン所要時間と定義する。 シミュレータと分析による 32 個の RF タグのアンチコリジョン所要時間を図 2.5 に示す。 分析値がシミュレーション値に概ね接近しており、シミュレーションの妥当性が示されて いる。

アンチコリジョン所要時間の内訳

それぞれの Q の条件下で、アンチコリジョンを構成するコマンド・応答の実行回数とフレーム状況の内訳も調査した。図 2.6 のグラフは、Q=4,5,6,7,8 での QueryRep コマンドと RN16 応答の実行回数を表す。Q の増加に従って、QueryRep コマンドも増加していることが観察された。これは、Q の増加に従ってどのタグも応答しないスロットが増加しているものと分析される。反対に、Q の増加に従って、RN16 応答は減少することが確認された。これは、Q の増加に従ってコリジョンが少なくなっているものと分析される(図 2.7 参照)。この均衡により、概ねタグ数と同数が最適なフレーム長が与えられる。し

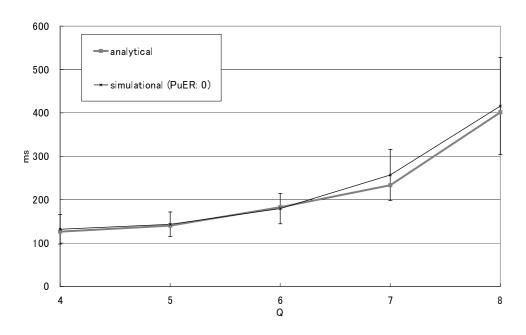


図 2.5 アンチコリジョン所要時間のシミュレーション値と分析値の比較 (RF タグ数 = 32).

かし、図 2.5 のように RF タグ数 32 個の場合の最適フレーム長は 32 ではなくて 16(Q=4) で与えられる。これは、アンチコリジョン手続きが進行するに従って残タグ数が減少すること、衝突となるスロットは空となるスロットよりスロット所要時間が短いためであると分析できる (表 2.1 参照)。

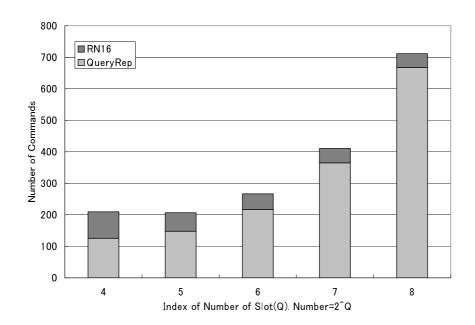


図 2.6 QueryRep コマンドと RN16 応答の実行数 (RF タグ数=32, PuER=0).

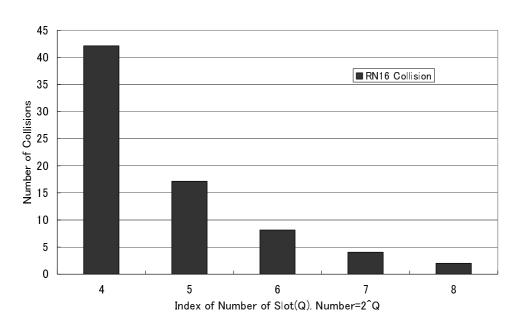


図 2.7 RN16 衝突数 (RF タグ数=32, PuER=0).

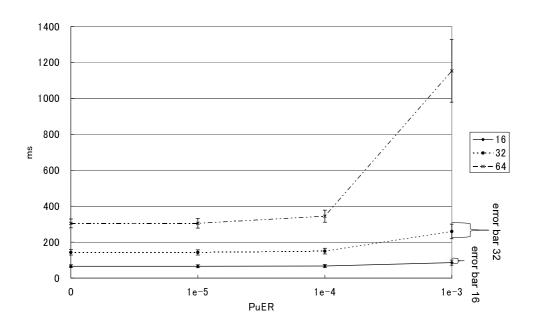


図 2.8 エラーありリターン回線におけるアンチコリジョン所要時間のシミュレーション値.

2.3 許容回線品質分析

ここでは、フレーム ALOHA に基づく RFID アンチコリジョン手続きの許容回線品質について議論する。分析は、リターン回線とフォワード回線に分けて行う。

2.3.1 リターン回線

リターン回線のパルスエラー率、フレーム長およびアンチコリジョン対象の RF タグ数を変化させるプロトコルシミュレーションを行い、エラーありリターン回線の許容回線品質を評価した。どの場合も、最小のアンチコリジョン所要時間を取るためフレーム長は RF タグ数と一致させた。フォワード回線のパルスエラー率 PuER は 0 に設定した。リターン回線のパルスエラー率 PuER は 0、 10^{-5} 、 10^{-4} 、 10^{-3} に設定した。それぞれの条件で 1,000 回の試行を行った。アンチコリジョン所要時間の平均時間と標準偏差をシミュレーション値として算出した (図 2.8)。グラフ中のエラーバーは標準偏差を意味する。特にアンチコリジョン対象の RF タグ数が 64 個の場合では、回線品質がパルスエラー率 PuER= 10^{-4} より低下すると、アンチコリジョン速度が悪化することが確認された。このタグ数とアンチコリジョン速度の悪化の依存関係は、プロトコル仕様上のパケット長と

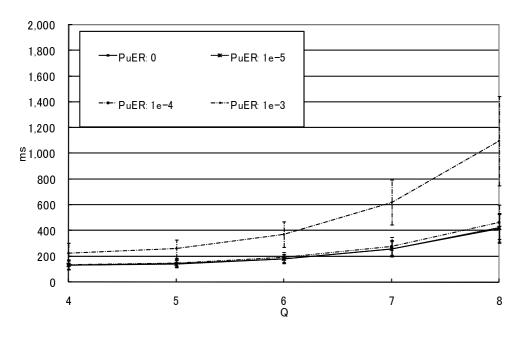


図 2.9 32 個の RF タグのアンチコリジョン所要時間のシミュレーション値.

残 RF 夕グ数の関係から生じる。リターン回線でもっとも頻繁なパケットは RN16 であり、これは 16bit つまり最低でもプリアンブルを含んで 44 パルスから構成される。64 個の RF 夕グが読み取り範囲にある場合、およそ約 2,800 パルス (64×44) がエラーなしで通信できる必要がある。これがパルスエラー率 PuER が 10^{-4} よりよい場合にアンチコリジョン速度が低下せず、パルスエラー率 PuER が 10^{-4} より悪い場合に急激に速度が悪化する理由である。

次に、エラーありリターン回線におけるアンチコリジョン所要時間とフレーム長最適化の効果について、32 個の RF タグの場合について調査した。シミュレーション結果を図 2.9 に示す。図中のエラーバーは標準偏差である。たとえ回線品質がパルスエラー率 $PuER=10^{-3}$ でも、32 個の RF タグを読み取る最適なフレーム長を取る Q は、4 もしくは 5 であることが示されている。これは、アンチコリジョン所要時間で約 300msec に相当し、一般的な産業界の要求に対して十分に短い。しかし、エラーのある回線でフレーム長を最適値付近に調整できない場合、アンチコリジョン所要時間は長大になる恐れがある。エラーのある回線でもフレーム長を最適値付近に調整できる場合、アンチコリジョン所要時間はそれぞれの場合で最短となる。しかし、回線品質がパルスエラー率 $PuER=10^{-3}$ より悪化した場合の標準偏差は著しく悪化する。このアンチコリジョン所要時間の変動は、動的フレーム ALOHA を動作させる場合の残 RF タグ数の推定に悪影響を及ぼす恐れが

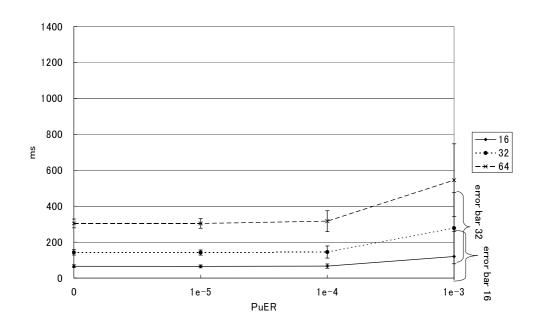


図 2.10 エラーありフォワード回線におけるアンチコリジョン所要時間のシミュレーション値.

ある。

以上をまとめると、64 個以下の RF タグの高速アンチコリジョンを行う場合は、パルスエラー率 PuER=10⁻⁴ 以上の回線品質が望まれる。回線品質は、アプリケーションが高速アンチコリジョンを必要としない場合に緩和できる。しかし、エラーあり回線では、不適切なフレーム長を選択することによりアンチコリジョン所要時間の変動が大きくなる恐れがあり、最適フレーム長を選択することが重要である。

2.3.2 フォワード回線

フォワード回線のパルスエラー率、フレーム長およびアンチコリジョン対象の RF タグ数を変化させるプロトコルシミュレーションを行い、エラーありフォワード回線の許容回線品質を評価した。どの場合も、最小のアンチコリジョン所要時間を取るためフレーム長は RF タグ数と一致させた。フォワード回線のパルスエラー率 PuER は 0、 10^{-5} 、 10^{-4} 、 10^{-3} に設定した。リターン回線のパルスエラー率 PuER は 0 に設定した。それぞれの条件で 1,000 回の試行を行った。アンチコリジョン所要時間の平均時間と標準偏差をシミュレーション値として算出した(図 2.10)。グラフ中のエラーバーは標準偏差を意味する。シミュレーションでは、特にパルスエラー率 PuER が 10^{-4} を超える場合に長大なアンチコリジョン所要時間を観測した。パルスエラー率 PuER= 10^{-3} の結果を図 2.8 で示したリ

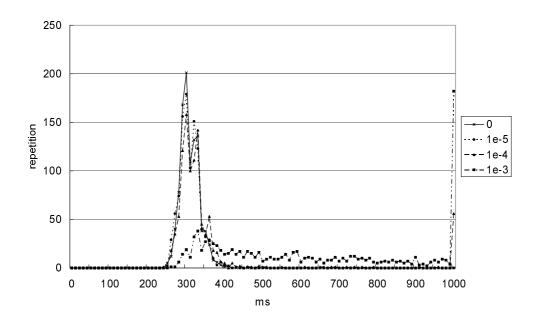


図 2.11 エラーありフォワード回線における 64 個の RF タグのアンチコリジョン所要時間のヒストグラム.

ターン回線における結果と比較した。第 2.2.2 節で述べたようにフォワード回線ではアンチコリジョン所要時間の最大値が 1,000msec で制限されているにもかかわらず、どの RF タグ数の場合でも標準偏差が増加したことが観測された。以上より、エラーありフォワード回線におけるアンチコリジョン所要時間の変動は非常に大きいという知見を得た。

この変動についてさらに調査するため、64 個の RF タグのアンチコリジョン所要時間をアンチコリジョン (フレーム長も 64) 所要時間のヒストグラムの形で示す (図 2.11)。図 2.11 では、300 msec で最大ピークが見られ、これが正常なアンチコリジョンの平均である。フレーム所要時間は約 30msec であることを考慮すると、次ピークおよび次々ピークはそれぞれ 330msec と 360msec であり、それぞれ、RF タグがコマンドを受信誤りしたため約 1、2 フレーム余分にアンチコリジョン時間を消費したものと思われる。これらのピークはパルスエラー率 PuER が 10^{-4} 以上では見られない。回線品質がパルスエラー率 PuER=0 では、所要時間が 1,000msec を超える試行が 1 つも存在しないのに対し、回線品質がパルスエラー率 PuER=0 では、所要時間が 1,000msec より短い試行は全体の試行の約 83% に限られることが図 2.12 に示される。インベントリにおけるプロトコルの進行状況を詳しく調べると、この長大な所要時間は Select、Query コマンドというリーダからの重要なコマンドの破棄により引き起こされることが分わかった。 QueryAdjust、Ack、QueryRep コマンドといった他のコマンドの破棄は、限定的な性能低下を引き起こした。

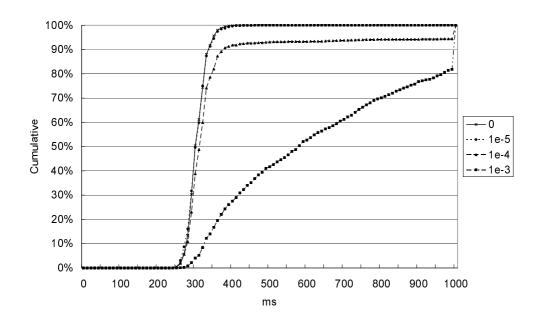


図 2.12 エラーありフォワード回線における 64 個の RF タグのアンチコリジョン所要時間の累積ヒストグラム.

RF タグが QueryAdjust コマンドを破棄すると、RF タグは前フレームが終了していないみなすため 1 フレームを失う。RF タグが Ack コマンドを破棄すると、RF タグはスロットを再び占有するまでの数スロットを失う。QueryRep コマンドの破棄による影響は限定的である。RF タグが選択したスロットがフレーム内の最終スロットでなければ、別のスロットを利用可能である。RF タグが最終スロットを選択し QueryRep コマンドを破棄した場合でさえも、RF タグは単に該当フレームでの RN16 を応答機会を失うだけである。しかしこの場合も、次のフレームでは破棄の影響はまったく残らずフレームの処理を正常に行える。まとめると、パルスエラー率 PuER=10⁻⁴ より有効なフォワード回線を準備することは重要である。リターン回線よりフォワード回線でのパケットエラーは深刻な影響がある。将来、新しいプロトコルを開発する際には、前方誤り訂正 (Forward Error Correction) または連送による重要なコマンドの保護を考慮すべきである。

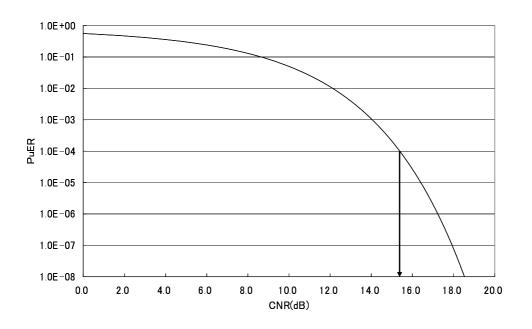


図 2.13 各 PuER における要求 CNR.

2.3.3 干渉源が RFID の場合の許容干渉量

ここまでランダムパルスエラーによる許容回線品質について議論し、現実的読み取り時間を得るのに必要な要求品質を導出した。雑音もしくは干渉源が相加性白色ガウス雑音 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) の場合、パルスエラー率 PuER とキャリア雑音比 CNR の関係は、古典的なエラー関数により表現でき、この関係を図 2.13 に示す。この図によると、パルスエラー率 PuER=10⁻⁴ での運用が必要な場合、キャリア雑音比 CNR=16dB を確保する必要がある。キャリア雑音比 CNR は、運用周波数帯が他の無線機器と共用されている場合は、回線設計の安全基準の要素とするべきである。他の RFIDシステムからの干渉は、リーダコマンドが信号成分と比べ大きいキャリア成分を含んでいるため、特に関心がもたれる事項である。図 2.14 は、キャリア成分と信号成分からなる実際のリーダスペクトラムである。このキャリア成分は、リーダとタグの受信部で除去可能である。従って、干渉源が他の RFID リーダの場合は AWGN の場合に比べて、許容干渉の増大が期待できる (キャリア雑音比 CNR を緩和できる)。ここまでの検討と結果の妥当性を判断するために、他の RFID リーダと AWGN の許容干渉を実験的に測定した。

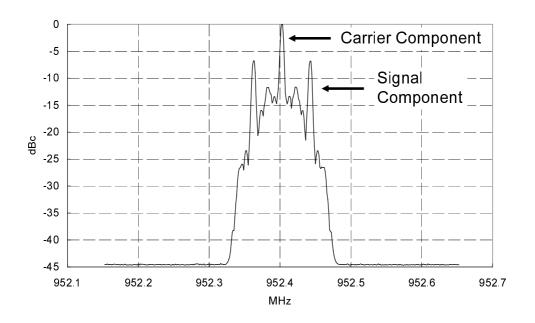


図 2.14 リーダスペクトラムのキャリア成分.

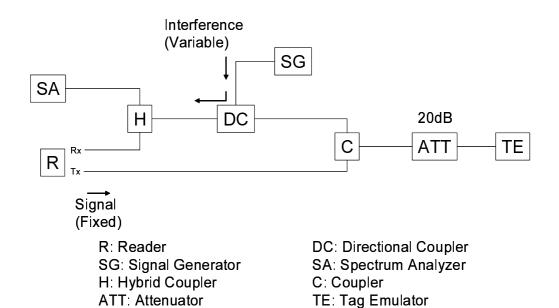


図 2.15 リターン回線の実験装置概略図.

リターン回線

2 つの商用 RFID リーダ (リーダ A、B) に対するリターン回線の許容干渉を実測した。 実験装置概略図を図 2.15 に示す。干渉波は AWGN と仮想リーダ信号の両方を信号発生

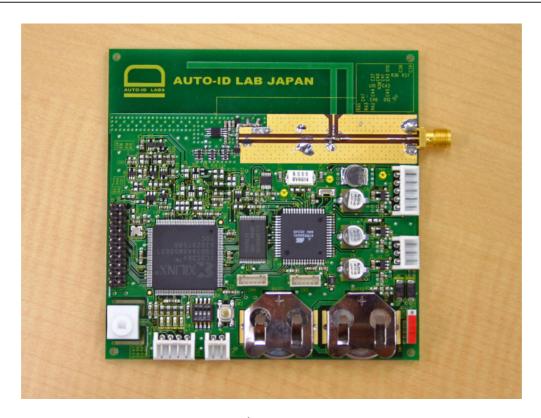


図 2.16 タグエミュレータ (BAP).

表 2.2 リターン回線の実験パラメータ.

Carrier frequency	(MHz)	953
BandWidth	(KHz)	200
TX power	(dB)	12.3
Cable/Coupler loss	(dB)	5.2
Tag reflection loss	(dB)	11.0

器で生成し、リターン回線に方向性結合器 (directional coupler) を介して適用した。干渉の影響は、希望干渉比 DUR に対する、RN16のパケットエラー率 (packet error rate, PER)で表現した。パケットエラー率はプログラマブルタグエミュレータ (図 2.16) [21] を用いて、付録 C で述べる手法で測定した。ぞれぞれの実験は少なくとも 3 パケットの誤りが観測されるまで行った。リターン回線の実験で用いたパラメータを表 2.2 に示す。本実験では希望干渉比とパケットエラー率を測定し、パルスエラー率とパケットエラー率の関係はRN16 が 44 パルス (16 ビットコマンドとプリアンブル) からなるとして別途分析した (図 2.17)。この図から、パルスエラー率 PuER=10⁻⁴ と PuER=10⁻³ は、それぞれ RN16 のパ

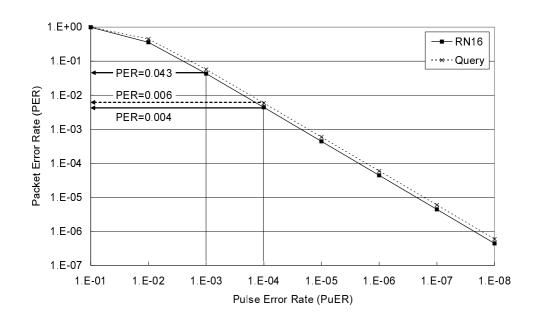


図 2.17 パケットエラー率 PER とパルスエラー率 PuER の関係 (RN16/Query).

ケットでパケットエラー率 PER=0.004 とパケットエラー率 PER=0.043 に相当することが理解できる。この図の Query コマンドのパケットのカーブは、フォワード回線について後述 (第 2.3.3 項) するため併記した。

結果を図 2.18 に示す。干渉源が RFID リーダの場合は、AWGN の場合と比較して希望 干渉比が緩和できることが示されている。

リーダ A では、パルスエラー率 $PuER=10^{-4}$ に相当するパケットエラー率 PER=0.004 を得るためには、AWGN で希望干渉比 18dB、リーダ干渉で 7.5dB を確保する必要があった。一方、リーダ B では、AWGN で希望干渉比 16.5dB、リーダ干渉で 12dB を確保する必要があった。結果として、図 2.13 よりわずかに悪く、パルスエラー率 $PuER=10^{-4}$ (パケットエラー率 PER=0.004) の希望干渉比を達成する 18dB を確保するのが安全と言える。

また、干渉源が RFID リーダと確認できる場合は、4.7 dB から 10.6 dB の範囲で、希望 干渉比を緩和できる。たとえパケットエラー率が $PuER=10^{-3}$ に相当する 0.043 まで劣化 しても、干渉源が RFID リーダと確認できる場合は、最大 9.9 dB まで希望干渉比を緩和できる。

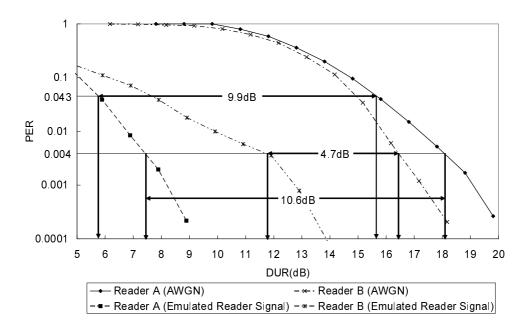


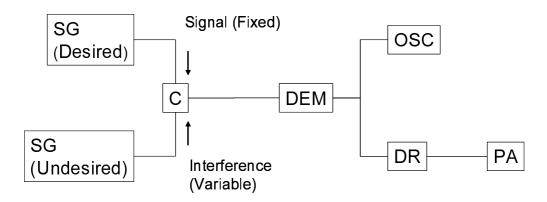
図 2.18 リターン回線の PER カーブ.

フォワード回線

フォワード回線での実験装置概略図を図 2.19 に示す。この実験では、信号発生器を用いて希望波としての Query コマンドを 2ms 毎に送信し、プロトコルアナライザに接続した 2 種類の ASK 復調器で受信した。復調器の受信帯域幅は 640kHz であった。AWGNであろうとリーダ信号であろうと希望波は別の信号発生器で生成された干渉波と結合された。正常に復調できたパケット数を全送信パケット数で割ったものがパケットエラー率 PER と呼ばれる。パルスエラー率 PuER とパケットエラー率 PER の関係は、Query コマンドが、22 ビットとプリアンブルつまり 59 パルスだとすると、図 2.17 のように表せる。

この図からパケットエラー率 PER=0.006(Query) はパルスエラー率 PuER=10⁻⁴ に相当する事が理解できる。QueryRep のような短いコマンドでは与えられたパルスエラー率でもっとパケットエラー率を緩和できるため、これを安全基準とすることができる。

結果を図 2.20 に示す。パルスエラー率 PuER= 10^{-4} に相当するパケットエラー率 PER=0.006 を得るためには、AWGN で希望干渉比 DUR15.5dB、リーダ干渉で 11dB を 確保する必要があった。復調器間の差異は 2dB 以下であった。干渉源が RFID に限定で きる場合は、希望干渉比 DUR を 5dB まで緩和できた。



SG: Signal Generator C: Coupler

DEM: Demodulator OSC: Oscilloscope DR: Data Recorder PA: Protocol Analyzer

図 2.19 フォワード回線の実験装置概略図.

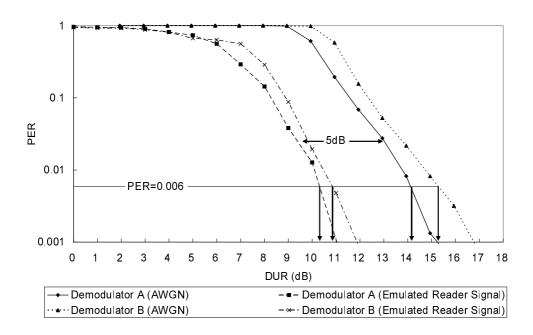


図 2.20 フォワード回線の PER カーブ.

2.4 RFID サイト設計への応用

第 2.3 節では、RFID アンチコリジョンにおける現実的な回線品質を導出する方法論について議論した。この方法論の主なアプリケーションは、第 1.6 節および第 2.1 節で触れた RFID サイト設計である。RFID サイトである倉庫のドッグドアやベルトコンベアでは、複数の RFID リーダが近接して稼動する。また、今後 RFID の使用帯域を ZigBee[35] などの別システムで共用することもありえる。導出した回線品質は、RFID サイト設計のパラメータ決定に対して貢献する。具体的には、本稿で議論した要求回線品質から、近傍の RFID リーダの配置間隔、アンテナのボアサイト方向決定、電波吸収体による遮蔽を定量化することが期待できる。ここでは、許容干渉量と被干渉 RFID システムと与干渉システムの最小隔離距離 (許容干渉源距離) を算出し、ここまでで提案した分析の実用性を明らかにする。

表 2.3 サイト設計アプリケーションのパラメータ.

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
Carrier Frequency (MHz)			953.0		
BandWidth (KHz)			200.0		
R-T distance (m)			1.0		
TX power (dBW)			0.0		
TX antenna gain (dBi)			6.0		
TX EIRP (dBW)			6.0		
Free Space Loss (dB)			32.0		
Tag Receiving power (dBW)			-26.0		
Permissible interference in forward link (dBW)	-37.0	-41.5		ı	
Minimum separation distance (m)	3.5	0.9		ı	
Tag DUR (dB)	11.0	15.5		ı	
Tag reflection loss (dB)			6.0		
Tag reflection power (dBW)			-35.0		
Receiver Ant. Gain (dBi)			6.0		
Receiver power (dBW)			-61.0		
Permissible interference in return link (dBW)		-	-68.5	-79.0	-67.0
Minimum separation distance (m)		-	266.8	893.7	224.5
Phase noise of VCO (dBW)			-119.5		
Thermal Noise (dBW)			-144.8		
Total DUR at receiver (dB)	'		7.5	18.0	6.0

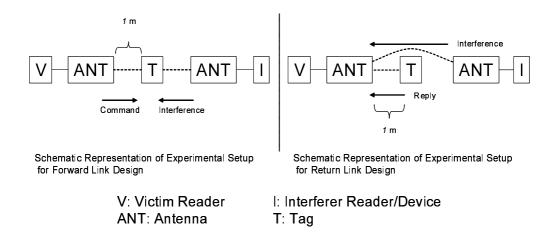


図 2.21 サイト設計における RFID リーダの配置概略図.

RFID 回線モデルとして [36] を参照すれば、許容干渉源距離は、以下の 5 つのシナリオの要求希望干渉比を満たすことにより計算できる。なお、許容干渉源距離は、与干渉 EIRP が 4dBW という想定で求めた。

- シナリオ 1 他の RFID リーダ由来の干渉がフォワード回線に適用される。要求希望干渉 比は、第 2.3.3 項で示したパルスエラー率 $PuER=10^{-4}$ を満足する 11dB である。
- シナリオ 2 干渉源が AWGN であることを除けばシナリオ 1 に類似する。要求希望干渉 比は、第 2.3.2 項および第 2.3.3 項で確認したパルスエラー率 $PuER=10^{-4}$ を満足する 15.5dB である。
- シナリオ 3 他の RFID リーダ由来の干渉がリターン回線に適用される。要求希望干渉 比は、リーダ A に関して第 2.3.1 項および第 2.3.3 項で示したパルスエラー率 $PuER=10^{-4}$ を満足する 7.5dB である。
- シナリオ 4 干渉源が AWGN であることを除けばシナリオ 3 に類似する。要求希望干渉 比は、パルスエラー率 $PuER=10^{-4}$ を満足する 18dB である。
- シナリオ 5 他の RFID リーダ由来の干渉がリターン回線に適用される。このシナリオでは、要求パルスエラー率は、第 2.3.1 項で述べた低速アンチコリジョンを許容するパルスエラー率 PuER=10⁻³ である。図 2.18 にしたがって要求希望干渉比は、6dBとなる。要求希望干渉比は、シナリオ 3 と比較し 1.5dB 緩和可能である。

全てのシナリオで、被干渉 RF タグは被干渉 RFID リーダアンテナのボアサイト方向に 1m 離して配置する。被干渉 RFID リーダのアンテナのボアサイトと与干渉システムは、図 2.21 のように対面し配置される。5 つのシナリオでの許容干渉量と許容干渉源距離は

表 2.3 の通りである。許容干渉量は、干渉の種類と要求パルスエラー率に著しく依存する。代表例は、リターン回線の干渉である。許容干渉源距離は一般的に 893.7m 確保する必要があるが、他の RFID リーダ由来の干渉が適用され、低速アンチコリジョンを許容される場合は、224.5m とすることが出来る。

2.5 結論

本サブテーマでは、フレーム ALOHA のプロトコルシミュレーションを用いて、現 実的な環境下における RFID のアンチコリジョンのための許容回線品質について研究し た。干渉源の種類として、近接 RFID システムを想定している点で現実的である。既存研 究は BER 等の指標であるが、本研究は希望干渉比 DUR で導出した点で実用的である。 主要な干渉源が AWGN の場合は、リターン回線とフォワード回線共にパルスエラー率 $PuER=10^{-4}$ よりよい回線品質が望ましい。アプリケーションが高速アンチコリジョンを 必要としない場合は、回線品質は緩和できる。しかしながら、エラーありリターン回線で はフレーム長の不適切な選択がアンチコリジョン速度の大きな変動をもたらすので、フ レーム長の最適化が重要となる。干渉源が RFID リーダの場合は、リーダ干渉のキャリア 成分がリーダ受信部で除去できるため、要求回線品質を最大約 10dB 緩和できる。重要な コマンドのパケットを失うとアンチコリジョン速度が著しく低下するため、フォワード回 線の保護は重要である。Select と Query コマンドはこの重要なコマンドであり、コマン ドを保護するのに十分な品質の回線を用意することが必要となる。フォワード回線では、 AWGN に対する希望干渉比 DUR で 17dB に相当するパルスエラー率 PuER=10⁻⁴ を確保 することが望ましい。リターン回線では、干渉源が RFID リーダの場合は、要求回線品質 を 5dB 緩和できる。また、導出した回線品質を用いて RFID サイト設計を行う代表的な 5 つのシナリオを示し、それぞれの干渉源許容距離を示した。

第3章

キャプチャ効果を利用する UHF 帯 RFID インベントリの高 速化

UHF 帯 RFID では、読み取り領域にある複数の RF タグの目録の作成 (イ ンベントリ) を行う。操作性の向上あるいは確実な読み取りのために、多元接 続制御技術 (アンチコリジョン) の高速化が望まれている。本サブテーマでは、 キャプチャ効果を有効利用する動的フレーム ALOHA により、UHF 帯 RFID インベントリを高速化する。複数の RF タグからのアクセス要求が衝突しても 電力差によりアクセスが成功することはキャプチャ効果と呼ばれており、この キャプチャ効果を有効利用する動的フレーム ALOHA により、UHF 帯 RFID インベントリを高速化する手法を提案した。従来キャプチャ効果を有効利用す るためには RF タグの応答分布モデルの事前構築が必要であったが、提案手法 ではフレーム内での空スロット数、成功スロット数、衝突スロット数の関係か ら直接キャプチャの発生確率を推定した。さらに推定したキャプチャ率を用い て、フレーム長を最適化することにより RFID インベントリを高速化した。プ ロトコルシミュレーションによりキャプチャ率推定精度と代表的既存手法に対 する高速化効果の基本性能を確認した。さらに、実機実装を用いた評価により 提案手法が代表的な既存手法と比較して安定して高速に動作することを確認 した。

3.1 序論

本サブテーマでは、リーダの受信電力の統計モデルを事前調査によって構築することなくキャプチャ効果を予想するとともに、キャプチャ効果を有効利用することによって動的フレーム ALOHA 方式を高速化する方法を提案する。第 3.2 節において、提案手法の詳細について述べる。第 3.3 節において、提案手法の基本特性について既存手法との比較の上分析する。第 3.4 節において、実機実装により提案手法の高速化効果について評価し、その高速化要因について分析する。第 3.5 節において、本サブテーマの結論を述べる。

3.2 提案

本章では、フレーム ALOHA において現フレームの占有状況からキャプチャ率および 残 RF タグ数を推定し、それを利用して動的フレーム ALOHA プロトコルを高速化する手 法について提案する。

3.2.1 キャプチャ率と残 RF タグ数の推定

RF タグがフレーム内のスロットを一様分布で選択するとみなすと、あるスロットを k 個の RF タグが選択する確率 P(k) は、式 (3.1) で表現できる [17]。

$$P(k) = \frac{(\mu)^k}{k!} e^{-\mu}$$
 (3.1)

ここでは読み取り範囲に存在する RF タグ数を N (リーダにとって未知数)、フレームサイズを L(リーダにとって既知数) とし、あるスロットで RF タグが応答する平均確率 (以降、応答期待値) $\mu=\frac{N}{T}$ と記載する。

式 (3.1) より、空スロットが発生する確率 P(0), あるスロットで 1 つだけ RF タグが応答する確率 P(1), 2 つ以上応答する確率 P(2+) は

$$P(0) = e^{-\mu}$$

$$P(1) = \mu e^{-\mu}$$

$$P(2+) = 1 - P(0) - P(1) = 1 - e^{-\mu} - \mu e^{-\mu}$$
(3.2)

となる。キャプチャ効果を考慮すると、スロットの状態は (a) 空スロット (b) 1 つの RF タグが応答した成功スロット (c) キャプチャされない衝突スロット (d) 衝突するがキャプチャされるスロットに分類することができる。ここで 2 つ以上の RF タグの応答が衝突し

た際にキャプチャとなる率を P_c と記載すると、式 (3.2) を用いて、フレーム状況とスロットの状態は以下のように関連付けることができる。

$$L_{E} = LP(0) = Le^{-\mu}$$

$$L_{S} = LP(1) + LP(2+)P_{c}$$

$$= L\mu e^{-\mu} + L(1 - e^{-\mu} - \mu e^{-\mu})P_{c}$$

$$L_{C} = L - L_{E} - L_{S}$$
(3.3)

仲上ライスフェージング環境では、衝突確率は選択 RF タグ数 k=2 で支配的であることが分かっており (付録 A に掲載)、これを適用するとフレーム状況は式 (3.4) で近似できる。

$$L_{E} = Le^{-\mu}$$

$$L_{S} = L\mu e^{-\mu} + L\frac{(\mu)^{2}}{2}e^{-\mu}P_{c}$$

$$L_{C} = L - L_{E} - L_{S}$$
(3.4)

式 (3.4) によりキャプチャ率 Pc および応答期待値 μ は式 (3.5) および式 (3.6) のように推定できる。

$$\mu = \ln \frac{L}{L_E} \tag{3.5}$$

$$P_c = \frac{2}{\mu^2 L_E} (L_S - \mu L_E)$$
 (3.6)

式 (3.5) より残 RF タグ数 B は $B=\mu L-L_S$ で定められる。式 (3.5,3.6) は空スロット数 L_E が 0 の場合、対応できないので、その場合には文献 [22] に従い残 RF タグ数 $B=2.39\cdot L_C$ とする。

3.2.2 次フレーム長の最適化

提案手法の次フレーム長 L' を、推定した残 RF タグ数 B およびキャプチャ率 Pc を用いて、スループット T_P が最大となるように求める。スループット T_P は、式 (3.7) で表現できる。ここで、 μ' は次フレームの応答期待値である。

$$T_P = \frac{L_S'}{L'}$$

$$= \mu' e^{-\mu'} + \frac{(\mu')^2}{2} e^{-\mu'} P_c$$
(3.7)

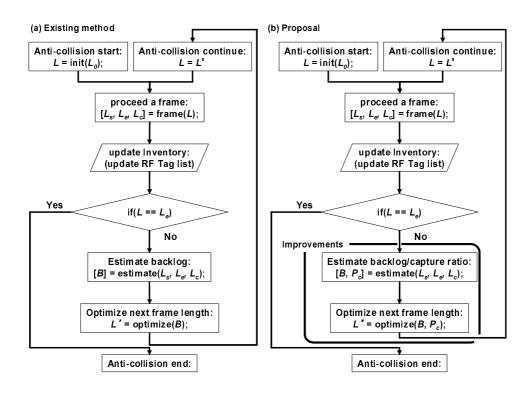


図 3.1 既存手法と提案手法のフローチャートの比較。

この式を μ' で微分することで、スループット T_P を最大にする次フレーム長 L' を求めることができる。

$$\frac{\partial T_{P}}{\partial \mu'} = 1 - \mu' + \mu' P_{c} - \frac{{\mu'}^{2}}{2} P_{c}$$

$$= 0$$
(3.8)

でスループット T_P は最大となる。次フレーム応答期待値 μ' は $\mu' > 0$ であるので、

$$\mu' = \frac{P_c - 1 + \sqrt{P_c^2 + 1}}{P_c} \tag{3.9}$$

となる。キャプチャ率 P_c が 0 の場合は次フレーム応答期待値 $\mu'=1$ でスループット T_P は最大となる。以上より、次フレーム長 L' の最適値は式 (3.10) となる。

$$L' = \frac{B}{\mu'} = \frac{BP_c}{P_c - 1 + \sqrt{P_c^2 + 1}}$$
 (3.10)

図 3.1 に、既存の動的フレーム ALOHA プロトコルと、提案手法のフローチャートを示す。両チャートとも、リーダに設定された初期フレーム長 L_0 を用いてアンチコリジョン処理を開始する。設定されたフレーム長で1フレームを実行後、読み取った RF タグの

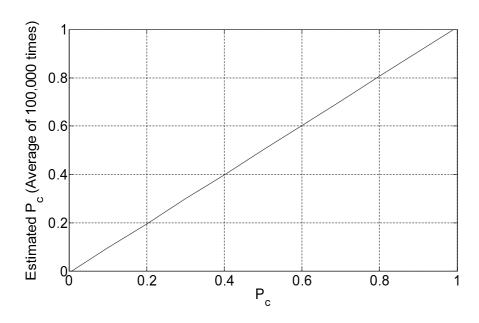


図 3.2 提案手法による、1 フレーム実行後のキャプチャ率 Pc 推定精度評価.

ID を目録に追加し、フレーム内で RF タグの応答がなければアンチコリジョンを終了する (アンチコリジョン終了判定)。残 RF タグがあればフレーム長を選択し再度フレームを実行する。次フレーム長の決定には 2 つの段階がある。前段階において、(a) の既存手法ではフレーム状況から残 RF タグ数 B のみを推定しているのに対し、(b) の提案手法では、キャプチャ効果を考慮した残 RF タグ数 B に加えてキャプチャ率 P_c を推定する。後段階において、(a) の既存手法では残 RF タグ数 B を用いて次フレーム長 L' を決定しているのに対し、(b) の提案手法では、残 RF タグ数 B に加えてキャプチャ率 P_c も用いて次フレーム長 L' を決定しているのに対し、(b) の提案手法では、残 RF タグ数 B に加えてキャプチャ率 P_c も用いて次フレーム長 L' を決定する。

3.3 提案の基本特性

提案手法の基本特性 [29] を解析するため、プロトコルシミュレーションを用いて、提案手法によるキャプチャ率と残 RF タグ数推定に用いる応答期待値の推定精度、およびアンチコリジョン速度を定量的に評価した。

3.3.1 推定精度の基本特性

提案手法の推定精度の基本特性として、キャプチャ率 P_c の真値と式 (3.6) による推定値の比較、任意のキャプチャ率 P_c における応答期待値 μ の真値と式 (3.5) による推定値の

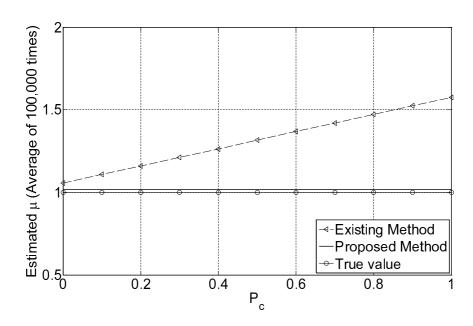


図 3.3 提案手法および Pc を考慮しない既存手法による、キャプチャ環境下で 1 フレーム実行後の応答期待値 μ 推定精度.

比較を行った。キャプチャ率 P_c 推定精度は、RF タグ数とフレーム長を固定した状態でRF タグがランダムにフレーム内のスロットを選択するモンテカルロシミュレーションによって調べた。RF タグのアクセスが衝突した場合のキャプチャ率 P_c を設定し、ALOHAフレーム実行後に観測できる空スロット L_E 、成功スロット L_S 、衝突スロット数 L_C から式 (3.6) により、キャプチャ率 P_c を推定する。ここでは 10,000 回試行の平均値を推定値とした。RF タグ数 N=50 フレーム長 L=50 の場合の真値と推定値の比較を図 3.2 に示す。グラフの横軸はキャプチャ率 P_c の真値、縦軸は式 (3.5) によるキャプチャ率 P_c の推定値である。提案手法によりキャプチャ率 P_c を正確に推測できることが示されている。

次に、残 RF タグ数推定に用いる応答期待値 μ の推定精度をキャプチャ率 P_c の推定精度評価と同一条件のシミュレーションで調べた。図 3.3 は、提案手法および Pc を考慮しない既存手法を用いてキャプチャ環境下での応答期待値 μ の推定精度を評価したグラフである。グラフの横軸は 0 から 1 までの 0.1 刻みのキャプチャ率 Pc、縦軸は 1 フレーム実行後の応答期待値 μ の推定値である。グラフ中の True Value は、真値 $(\mu=N/L=50/50=1)$ である。キャプチャ率 P_c を考慮しない既存手法 (Existing Method) および提案手法 (Proposed Method) は、それぞれ、式 (1.4) および式 (3.5) の残 RF タグ推定手法を用いて応答期待値 μ 推定を行った結果である。キャプチャ率 P_c を考慮しない既存手法では、キャプチャ率 P_c が増加するに従い、推定した応答期待値 μ が真値から乖離

することが分かる。提案手法がキャプチャ率 P_c に関わらず残 RF タグ数を正確に推定できることが確認できた。

3.3.2 アンチコリジョン所要スロット数の基本特性

提案手法を RFID アンチコリジョンに適用した場合の所要スロット数について、キャプチャのない環境 (キャプチャ率 $P_c=0$)、部分的なキャプチャのある環境 (キャプチャ率 $P_c=0.5$)、完全キャプチャ環境 (キャプチャ率 $P_c=1$) で代表的な既存手法と比較した。アンチコリジョン所要スロット数は、アンチコリジョン対象の RF タグの全てをアンチコリジョン処理するのに必要なフレーム、および、アンチコリジョン終了判定のフレームに含まれるスロット数の合計とした。比較対象の既存手法を含む以下の 4 手法について比較した。

• 提案手法

残 RF タグ数推定手法は式 (3.5,3.6) を、次フレーム長決定手法は式 (3.10) を実装した。空スロット数 $L_E=0$ の場合にのみ、式 (1.1) を適用した。

• Schoute の手法

残 RF タグ数推定手法は式 (1.1) を、次フレーム長決定手法は次フレーム長 L'=B とした。ただし、推定した残 RF タグ数 B=0 の場合は、次フレーム長 L'=L として実装した。

▼ 下限値 (Vogt の手法)

残 RF タグ数推定手法は式 (1.2) を、次フレーム長決定手法は Schoute の手法と同様に実装した。

• Chen の手法

残 RF タグ数推定手法は式 (1.3) を、次フレーム長決定手法は Schoute の手法と同様に実装した。

文献 [23] では RF タグのスロット占有を確認する認証パケットに別途 1 スロットを割り当てているが、本章では、文献 [7] と同様に認証パケットは占有を試みたスロット内で送られるとし、別途スロットを割り当てていない。また、以降全てのシミュレーションにおいて、初期フレーム長 L_0 は 16、アンチコリジョン対象の RF タグ数は 1 から 491 まで (解像度 10)、同一条件で 1,000 回の試行を行い平均値をアンチコリジョン所要スロット数とした。

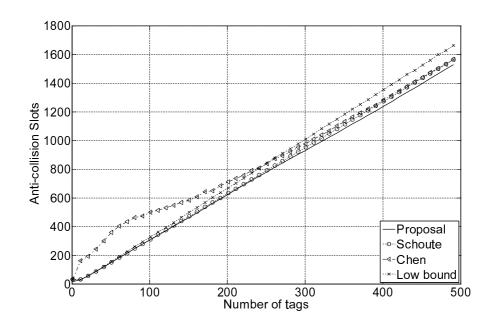


図 3.4 キャプチャ率 $P_c = 0$ 環境下における、提案手法と既存手法によるアンチコリジョン所要スロット数の比較.

はじめに、キャプチャのない環境 (キャプチャ率 $P_c=0$) で評価した。図 3.4 に提案手法と既存手法によるアンチコリジョン所要スロット数の比較を示す。横軸はアンチコリジョン対象 RF タグ数、縦軸はアンチコリジョン所要スロット数である。提案手法は、アンチコリジョン対象 RF タグ数によらず、アンチコリジョン所要スロット数が安定して最小となる。提案手法、Schoute の手法、および、下限値では、アンチコリジョン対象 RF タグ数が増えるに従い、アンチコリジョン所要スロット数が線形に増加する傾向が見られる。一方、Chen の手法では、アンチコリジョン対象 RF タグ数が 300 以上の場合に Schoute の手法と同程度に高速であるが、200 未満では他の方式に比較してアンチコリジョン所要スロット数を要する。この現象は、Chen の手法で用いられる $L_S=L_E=0$ および $L_S\neq 0$ 、 $L_E=0$ 、 $L_C\geq L_S$ の場合に残 RF タグ数 B=256 を推定値とする機構によって説明可能である。初期フレームに対してアンチコリジョン対象の RF タグ数が大きくなる場合、Chen 以外の手法ではフレームの伸長に数フレームを要するが、Chen の手法では 1 度に ALOHA フレームを 256 まで伸長する。しかし、アンチコリジョン対象の RF タグ数が200 より小さい場合では、Chen の手法は過度に ALOHA フレームを伸長しすぎるため不利に働き、アンチコリジョン対象の RF タグ数に対する安定度に劣る。

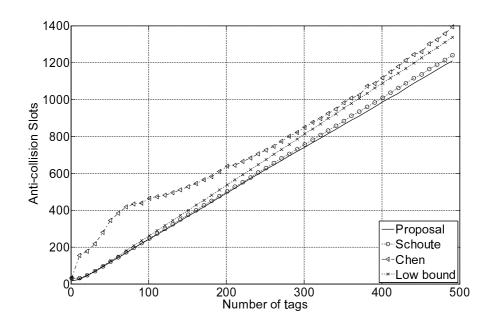


図 3.5 キャプチャ率 $P_c = 0.5$ 環境下における、提案手法と既存手法によるアンチコリジョン所要スロット数の比較.

次に、部分的なキャプチャのある環境 (キャプチャ率 $P_c = 0.5$) で評価した。キャプチャ率 $P_c = 0.5$ は以前、著者らが静的フレーム ALOHA におけるキャプチャ率を実測 [28] し、導いた値である。図 3.5 に提案手法と既存手法によるアンチコリジョン所要スロット数の比較を示す。軸等の関係は、図 3.4 と同様である。このグラフから RF タグ数が増加しても提案手法の所要スロット数が安定して最小となることが分かる。

さらに、完全キャプチャ環境 (キャプチャ率 $P_c=1$) で評価した。図 3.6 に提案手法と既存手法によるアンチコリジョン所要スロットの比較を示す。軸等の関係は、図 3.4 と同様である。このグラフからも、提案手法の所要スロット数が安定して最小となることが分かり、その傾向はキャプチャ率 P_c が大きくなるほうが顕著となる。

最後に、提案手法の 2 段階 (第 3.2.1 項および第 3.2.2 項) のうちどちらが RFID インベントリの高速化に対して支配的であるかを評価した。提案手法を全て実装した完全実装 (Proposal) を、提案手法の残 RF タグ数推定手法のみを式 (3.5,3.6) で実装し次フレーム長決定手法は次フレーム長 L'=B とした部分実装 (Ignore P_c) と比較した。図 3.7 に結果を示す。軸等の関係は、図 3.4 と同様である。このグラフから、完全実装は部分実装と比較して安定して優れているものの、その差は小さいことが分かり、提案手法の前段階 (第 3.2.1 項) が高速化に対して支配的であると認められる。

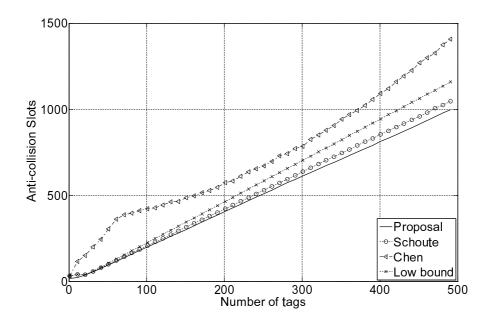


図 3.6 キャプチャ率 $P_c = 1.0$ 環境下における、提案手法と既存手法によるアンチコリジョン所要スロット数の比較.

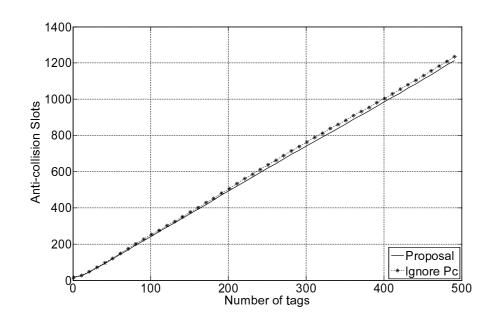
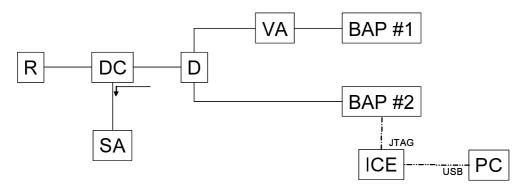


図 3.7 キャプチャ率 $P_c = 0.5$ 環境下における、提案手法と提案手法の部分実装のアンチコリジョン所要スロットの比較.



R: Reader SA: Spectrum Analyzer
D: Divider DC: Directional Coupler
ANT: Antenna VA: Variable Attenuator

ICE: In-Circuit Emulator BAP: Battery Assisted Passive Tag

図 3.8 キャプチャ率実測の実験装置概略図.

3.4 評価

ここまで、プロトコルシミュレーションによって提案手法の基本特性とその高速化効果について議論し、その優位性について示した。シミュレーションではアンチコリジョン対象の全 RF タグからの応答が衝突した際に、一定のキャプチャ率を適用する電波伝搬環境を考慮し、アルゴリズムの基本的な特性について比較検討した。しかし RFID における実際の電波伝搬環境でのキャプチャ効果の発生原因について考慮すると、RF タグ群における 1. 位置の違いによる自由空間損失の相違、2. フェージングの影響の相違、3. 相互インピーダンスによる RF タグアンテナ利得の相違によって、キャプチャ効果が発生していると思われ、現実的には RF タグ毎によってキャプチャ率は異なると考えられる。

そこで、実際のキャプチャ効果を確認するため、実験によりリーダ受信部での RF タグの応答電力差 (希望干渉比) とキャプチャ率の関係を計測した。実験装置の構成を図 3.8 に示す。実験では、任意の希望干渉比を設定し、RFID リーダからのコマンドを 2 つの RF タグで同一スロット内で応答させ、リーダの受信部で衝突した応答が復調できた割合をキャプチャ率として記録した。任意の希望干渉比は、2 つの RF タグ (BAP #1 および 2) からの応答の 1 つ (BAP #1) を可変減衰器を用いて調整することにより、設定した。方向性結合器を介して接続したスペクトラムアナライザを用いて、この 2 つの RF タグからの応答レベルを個別に計測し、2 つの RF タグの応答電力が同一になる減衰量で希望干渉比は 0dBとなるよう校正した。同軸ケーブルで接続するため、同一のスロットで応答させるため、

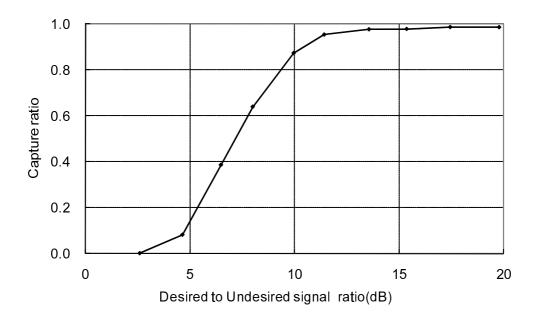


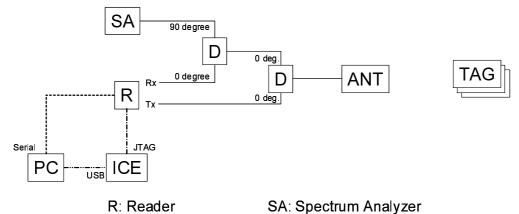
図 3.9 実測したキャプチャ率と希望干渉比の関係.

および RF タグが発する応答パケットのパケット損失数を測定するため、RF タグとして、C1G2 プロトコルに準拠したプログラム可能な電池付きパッシブタグ (Battery-Assisted Passive tag, BAP タグ) [21] を用いた (付録 C)。キャプチャ率は、C1G2 プロトコルのアンチコリジョンにおいて RF タグから最も多く発生する RN16 (プリアンブル +16bit) を最低 5000 パケット応答させ、正しく RFID リーダで復調できた RN16 の割合で表した。具体的には衝突した応答を RFID リーダが復調できた割合を ICE に接続した RF タグ (BAP #2) を介して観測し、実測した。

実測した希望干渉比とキャプチャ率の関係を図 3.9 に示す。横軸は希望干渉比を、縦軸はキャプチャ率を表す。この図から、キャプチャ率は一定ではなく希望干渉比により増減することが示された。タグ応答の希望干渉比は、付録 A で議論する確率密度分布関数 (PDF) によって特徴づけられると考えられるが、タグ群の RFID の応答電力の分布について調査した例はあまりない。

そこで、提案した手法の現実的な優位性を確認するため、実機実装による実測評価を 行った。

実験装置の構成を図 3.10 に、実験装置の配置を図 3.11 に示す。実験では、アルゴリズムの違いによるアンチコリジョン所要スロットの比較を行った。アンチコリジョン所要スロットの実測は、RFID リーダが RF タグのアンチコリジョンに要したスロット数を実測



D: Divider ANT: Antenna

ICE: In-Circuit Emulator

暗室

図 3.10 高速化実測の実験装置概略図.

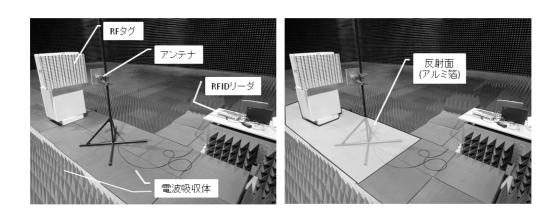


図 3.11 実験装置の配置図.

1反射面環境(暗室内)

した。RFID リーダを ICE 経由でデバッガ駆動することにより、提案手法と既存手法を用いて実装したアルゴリズムで RFID リーダを動作させた。RFID リーダが備える RS232C ポートを経由し、各フレーム状況を出力した。5 分間インベントリを繰り返し実行し、出力したフレーム状況からアンチコリジョン所要スロットとアンチコリジョンに参加したRF タグ数を記録した。

この実験では、RFID リーダの動的フレーム ALOHA のアルゴリズム、電波伝搬環境を変更して実測を行った。アルゴリズムとして、既存手法として 第 3.3 節のシミュレーションで提案手法に最も肉薄した Schoute の手法と提案手法を用いた。電波伝搬環境として、フェージングの発生しない電波暗室と電波暗室内にアルミ箔を用いて床面だけに反射

面を用意した環境 (1 反射面環境と呼ぶ) を用いた。RF タグとして、スチレンボードにそれぞれ配置した 150 個の RF タグを用いた。

実験の結果を以下に示す。図 3.12 および図 3.13 は、暗室内および 1 反射面環境下での 100 個前後の RF タグのアンチコリジョン所要スロット数のアルゴリズムによる比較である。これらの図は、提案手法 (Proposal) と Schoute の手法それぞれを散布図として示し、それぞれの系列の線形近似曲線を最小二乗近似で示したものである。

図 3.12 の 2 つの線形近似曲線は傾きがほぼ同じであり y 切片が高々 10msec 程度しか差がない。従って暗室内では、アルゴリズムによるアンチコリジョン所要スロットの違いは顕著に認められない。これは、フェージングが起こりにくく RF タグの応答電力の差が小さくキャプチャ効果が起こりにくいためと考えられる。提案手法がキャプチャ効果を考慮した定式化をしており、キャプチャ効果の起こりにくい環境で優位性が示されないのは妥当である。

一方、図 3.13 では線形近似曲線の傾きがほぼ同じであるが y 切片が 200msec 弱異なる。従って 1 反射面環境下では、アルゴリズムの違いによるアンチコリジョン所要スロットの違いが認められ、提案手法がおおむね安定して高速になっていることがわかる。絶対値が 1200msec 程度であるので平均的には 20% 弱の高速化といえよう。これは、用意した反射面によってフェージングが発生し、RF 夕グの応答電力に差が発生しキャプチャ効果が起こりやすくなっているためと考えられる。

これらの2つの環境でのアンチコリジョン所要スロットの差の要因分析を確認するため、応答分布実測を行った。応答分布実測では、同様の実験装置を用いてインベントリ操作を5分間連続して行い、その間のRFタグからの応答の受信信号強度(RSSI: received signal strength indication)をRFIDリーダで測定し、その分布を調査した。実際に2つの環境で実測した分布を図3.14に示す。電波暗室(Anechoic)および1反射面環境(Reflection)の分布を比較すると、電波暗室の分布が-66から-53dBであるのに対し、1反射面環境の分布は-68から-52dBと1反射面環境では分布が広範囲にわたっており、RFタグの応答電力に差が生まれキャプチャ効果の起こりやすい環境となっていることが確認できた。

これらの実験から、提案手法はフェージングの発生する現実的な環境下において既存手法より有効であるということが確認された。しかし、図 3.12 および 3.13 では、図 3.4-3.6 と比べてアンチコリジョン所要スロットに開きがある。これは、使用した RFID リーダのフレーム状況判定に誤りが生じている恐れがあると考えられる。実際に記録したインベントリのフレーム状況を付録 B に掲載した。この状況からフレーム判定が正確に行えない

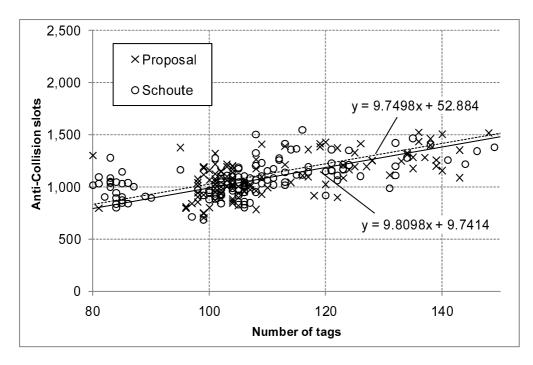


図 3.12 暗室内でのアンチコリジョン所要スロットの比較.

場合、残 RF タグ数推定およびインベントリの終了判定に支障が出る恐れがあり、動的フレーム ALOHA の性能に影響を及ぼすことが分かった。

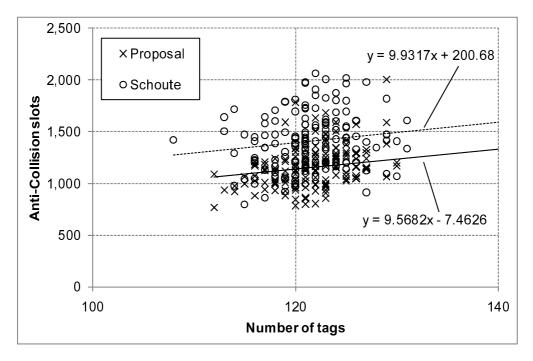


図 3.13 1 反射面環境下でのアンチコリジョン所要スロットの比較.

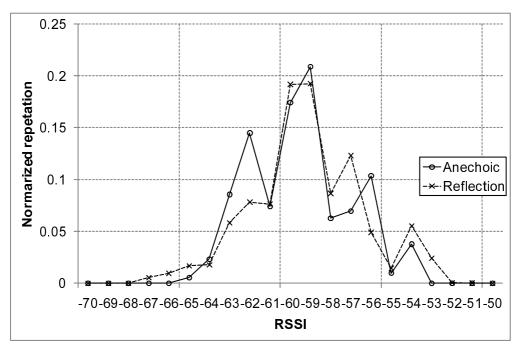


図 3.14 正規化した実測応答分布の比較.

3.5 結論

本サブテーマでは、電波伝搬モデルが不定でもキャプチャ効果を予想でき、キャプチャ 効果を有効利用することによって、動的フレーム ALOHA 方式を高速化する方法を提案 した。提案方式を利用する動的フレーム ALOHA を RFID におけるアンチコリジョンに 適用することで、UHF 帯 RFID インベントリを高速化可能である。RFID の読み取りが仲 上ライスフェージング環境では2つの衝突でキャプチャ効果が発生する確率が支配的であ ることを利用すると、フレーム状況を観測することでキャプチャ率およびキャプチャ率を 考慮した残 RF タグ数を解析的に求めることができる。提案手法ではこれを利用して、残 RF タグ数を正確に予想するとともに、キャプチャ発生率を予想してフレーム長を決定す ることによって、UHF帯 RFID インベントリを高速化する。数値シミュレーションによ る検証により、提案手法は既存の代表的な手法のいずれと比べても高速であり、かつキャ プチャ率が変化しても安定して性能を発揮できること、および、キャプチャ効果を考慮し てフレーム状況から残 RF タグ数を推定する部分の RFID インベントリ高速化への貢献が 支配的であることが明らかとなった。さらに、実機実装による実測評価により、提案手 法の高速化効果を確認した。実測評価の環境での RF タグ応答分布を測定し、提案手法の 高速化要因としてフェージング環境における RF タグ応答分布の広がりに由来するキャプ チャ効果増大が貢献していることが確認された。これは、RFID が実際に使用される壁や 床天井のような反射面が多数存在する環境において提案手法が有効に働くことを意味して いる。

第4章

結論

本論文は、UHF 帯 RFID インベントリを確実、高速に作成する課題に取り組んだ研究に関するものである。本論文ではこれを、確実化、高速化という2つのサブテーマに分割しそれぞれ述べた。本研究によって得られた成果をサブテーマごとにまとめる。

第2章に記したサブテーマ1では、標準的なUHF帯RFIDエアプロトコルの現実的な環境下における許容回線品質とアンチコリジョン速度の関係を定量化した。パケットエラー率やビットエラー率という指標のみならず希望干渉比という実際の現場で使用できる単位によってこれを導出した点で実用的である。干渉源の種類として近接RFIDシステムを想定している点で現実的である。その成果はUHF帯RFIDシステムの設置設計に応用できる。導出した回線品質を用いてRFIDシステム設置設計を行う応用を提供した。代表的な5つのシナリオを示し、それらの干渉源許容距離を示した。以下に代表的成果についてまとめる。

- 一般的な干渉での安全指針を導出したリターン回線とフォワード回線共に PuER=10⁻⁴ よりよい回線品質が安全である。
- 干渉減の種類や、アプリケーションの要求により回線品質が緩和できることを示した。干渉源が RFID リーダの場合は、リーダ干渉のキャリア成分がリーダ受信部で除去できるため、要求回線品質を最大約 10dB 緩和できる。アプリケーションが高速アンチコリジョンを必要としない場合は、回線品質は緩和できる。
- 動的フレーム ALOHA でのエラーがプロトコルに及ぼす影響を分析した。リターン回線では、フレーム長の適切な選択が必要である。フォワード回線では、重要なコマンドのパケットを失うとアンチコリジョン速度が著しく低下するため、回線の保護は重要である。C1G2 プロトコルでは、Select と Query コマンドはこの重要な

コマンドである。

- フォワード回線では、AWGN に対する希望干渉比で 17dB に相当する $PuER=10^{-4}$ を確保することが望ましい。
- リターン回線では、干渉源が RFID リーダの場合は、要求回線品質を 5dB 緩和できる。

第3章に記したサブテーマ2では、電波伝搬モデルが不定でもキャプチャ効果を予想でき、キャプチャ効果を有効利用することによって、動的フレーム ALOHA 方式を高速化する方法を提案した。以下に代表的成果についてまとめる。

- 提案手法では、キャプチャ効果を MAC レイヤのプロトコルである、動的フレーム ALOHA の定式化に盛り込む手法をとった点で新規性がある。これにより、キャプチャ環境において、提案手法残 RF タグ数を正確に予想するとともに、キャプチャ 発生率を予想してフレーム長を決定することによって、UHF 帯 RFID インベント リを高速化が可能となった。
- 数値シミュレーションによる基本特性の確認を行った。提案手法は既存の代表的な 手法のいずれと比べても高速であり、かつキャプチャ率が変化しても安定して性能 を発揮できること、および、キャプチャ効果を考慮してフレーム状況から残 RF タ グ数を推定する部分の RFID インベントリ高速化への貢献が支配的であることが明 らかとなった。
- 実機実装による実測評価により、提案手法の高速化効果を確認した。平均的には約20%の高速化を実現できる。実測評価の環境でのRFタグ応答分布を測定し、提案手法の高速化要因としてフェージング環境におけるRFタグ応答分布の広がりに由来するキャプチャ効果増大が貢献していることが確認された。これは、RFIDが実際に使用される壁や天井のような遮蔽物が多数存在する環境において提案手法が有効に働くことを意味している。

それぞれのサブテーマの研究成果の利用者について挙げる。サブテーマ1の研究成果は、RFID サイト設計を理論的、解析的に実施できる点である。想定される利用者として、RFID サイト設計者 (ユーザ企業、ソリューションベンダ等) を挙げる。サブテーマ2の研究成果は、高速インベントリのできるリーダが開発可能になる点である。想定される利用者として、RFID リーダベンダを挙げる。

また、本研究は UHF 帯 RFID を主な研究領域として議論しているが、UHF 帯 RFID と

第 4 章 結論 54

同様に RFID リーダの読み取り範囲に複数の RF タグが多数ある場合は、提案したアンチコリジョン方式が応用できる。さらに、RFID と一般の無線アクセスの違いについても論じており、定式化段階を一部変更することで提案手法を一般の無線アクセスにも応用でき、無線通信分野など研究対象とした分野以外のコミュニティの貢献も期待できる。

本研究から派生して期待される応用として、SCM における個品管理 (Item Level Tagging) と可搬型リーダの実現をあげる。個品管理は、本来、UHF 帯 RFID が期待されていたアプリケーションであるが、本研究で扱った確実化の観点から実現が難しかった領域である。個品管理では、おもにサブテーマ 1 の研究成果である確実化により、一つ一つの製品に RF タグを貼付しても、一括読み取りが期待できる環境を作りこむことが可能になると考えられる。個品管理では、多数の RF タグの一括読み取りも必要であるので、サブテーマ 2 の研究成果である高速化も当然必要な機能となる。可搬型リーダは、据え置き型リーダとは違い、電波伝搬環境が事前に決定できない。サブテーマ 2 の提案手法は、使用環境およびアンチコリジョン対象タグ数が動的に変化しても対応可能であり、研究成果の応用が期待される。

以上に述べたように、本研究の成果により近年注目されている UHF 帯 RFID システムのインベントリの確実化を解析的に実現可能になった。また、現実的環境下で効果のある高速化手法も提案したことで速度向上のみならず、インベントリの繰り返しによる確実性向上にも期待できる。これら 2 つの成果により、論文で述べた当初の研究目的を達成したと言え、本研究の意義は大きいと考えられる。

謝辞

本論文は、著者が慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科後期博士課程の在学中の研究成果をまとめたものです。

本論文をまとめるにあたり、終始暖かい激励とご指導、ご鞭撻を頂いた慶應義塾常任理 事・環境情報学部教授 村井純博士に心より感謝申し上げます。本論文の主査を引き受けて くださった村井博士には、著者が環境情報学在学中の 1997 年よりインターネット・RFID 関連の研究に関してご指導をいただきました。世界でも類をみない研究の機会を与えてい ただくと同時に、研究以外でも多くのプロジェクトに参加させていただいた経験は何事に も代えがたく思います。村井博士と共同研究室を運営され、本論文の副査をひきうけてく ださった同大学環境情報学部長教授 徳田英幸博士に心より感謝申し上げます。徳田博士 には、客観的立場からご批判、ご意見をいただき、それによって著者の不勉強によって見 過ごしていた問題について検討することで新しい知見を得ると同時に研究の客観性を担保 することができたと思います。村井博士と共同研究室を運営され、本論文の副査をひきう けてくださった同大学環境情報学教授 中村修博士に心より感謝申し上げます。中村博士 には、毎年の博士研究合宿をはじめ多くの研究指導の場において叱咤激励をいただき、著 者が自分の甘さを認識することができたと同時に、大学外での RFID 実験の機会を与えて くださり研究活動と成果を広く世の中にアピールし、研究の了解性を担保することができ たと思います。研究の直接的な指導をしてくださった同大学大学院政策・メディア研究科 特別研究准教授 三次仁博士に心より感謝申し上げます。三次博士が慶應義塾に着任され た 2004 年より、著者が本論文で扱った領域で全くの素人状態でにもかかわらず、興味深 い研究テーマを与えていただいたき、手取り足取りのご指導を賜りました。三次博士のご 指導なくしては本論文は存在しえませんでした。重ねて感謝いたします。

研究室所属当初よりご指導をたまわりました同大学大学院政策・メディア研究科特別研究准教授 植原啓介博士、同大学大学院政策・メディア研究科特別研究講師 羽田久一博士 に心より感謝申し上げます。両氏には研究指導を直接していただいただけでなく、研究者 第 4 章 謝辞 56

の先輩として多くのことを教えていただきました。両氏のご指導なくして 12 年の長きに わたり在学した研究者生活はなかったと確信します。重ねて感謝いたします。

著者が所属する Auto-ID ラボラトリの関係者の皆様および村井研究室諸兄および卒業 生には、多大なご指導ご鞭撻を賜りました。心より感謝申し上げます。SFC 研究所上席研 究員 徳増理氏、株式会社日放電子 白石雅彦氏に心より感謝申し上げます。両氏には、研 究環境の構築および研究支援をしていただいたのみならず、ものづくりの大切さとレベル の高さを体験させていただき、著者にはとても影響がありました。重ねて感謝いたしま す。ラボ設立時に元同大学大学院政策・メディア研究科特別研究講師であり、株式会社イ ンターネットイニシアティブ 技術研究所主任研究員 宇夫陽次朗氏に心より感謝申し上げ ます。氏には論文誌を共著していただいたのみならず、研究者としてのものの突き詰め方 を教えていただきました。重ねて感謝いたします。同大学大学院政策・メディア研究科特 別研究助教 鈴木茂哉氏、稲葉達也氏、中根雅文氏に心より感謝申し上げます。著者は、本 論文のみならず日常的な研究指導を賜り、氏らの経験に裏打ちされた豊かな見識と学識に 大変感銘を受けました。重ねて感謝いたします。同大学大学院政策・メディア研究科後期 博士課程 小原泰弘氏、藤枝俊輔氏、三川荘子氏に心より感謝申し上げます。只ひたすら自 我作古の業にのみ心を委ね研究に邁進する氏らと机を並べ、切磋琢磨することによって、 ともに博士論文の執筆をやりぬくことができたと確信します。重ねて感謝いたします。渡 辺康恵氏をはじめとする村井研究室の秘書の方々、石川公子氏をはじめとするラボ事務局 の方々には煩雑で膨大な事務作業を遂行していただいたのみならず、学事手続等も代行し ていただきました。心より感謝申し上げます。ここに記すことのできなかったすべての Auto-ID ラボラトリ、徳田村井研究室、WIDE プロジェクトの関係者の皆様に重ねて感謝 いたします。

最後に、就学機会を与えてくれ様々な支援をしていただいた両親と家族に、私生活を支えていただいた慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程 坂野あゆみ氏に感謝いたします。

これら多くの方々のご支援ご尽力がなければ本論文は存在しえませんでした。重ねて深く感謝いたします。

2008年2月18日 川喜田 佑介

参考文献

- [1] E.W. Schuster, S.J. Allen, and D.L. Brock, Global RFID, Springer-Verlag, 2007.
- [2] 流通システム開発センタ, "第 5 回 EPC RFID FORUM 資料," http://www.epc-rfid-forum.jp/info/forum060721.html, 2006.
- [3] 三次仁,羽田久一,金田浩司,"消費生活用製品のライフサイクル情報記録装置としての RFID," 2007 信学ソ大(通信), no.BS-12-5, pp.S-158-S-159, September 2007.
- [4] "Aerospace ID," http://www.aero-id.org/, 2007.
- [5] K. Finkenzeller, RFID Handbook Second Edition, Wiley, 2003.
- [6] Y. Kawakita, Y. Uo, O. Nakamura, and J. Murai, "Use of RFID at large-scale events," IATSS RESEARCH, vol.29, no.1, pp.31–39, May 2005.
- [7] EPCglobal, "Class 1 generation 2 UHF air interface protocol standard version 1.1.0," http://www.epcglobalinc.org/standards_technology/specifications. html, December 2005.
- [8] J. Mitsugi, K. Kaneda, A. Yamagata, T. Tokuda, H. Kuwahara, and O. Fujisawa, "Characterizing UHF RFID readability for product packaging of consumer electronics," The Third MIT RFID Academic Convocation, Shanghai, 2006.
- [9] J. Mitsugi, "Efficient frequency sharing of baseband and subcarrier coding UHF RFID systems," Auto-ID Labs. White Paper Series, 2007.
- [10] (社) 日本自動認識システム協会, "UHF 帯電子タグシステムの高度利活用・普及促進 に関する調査研究報告書," http://www.jaisa.or.jp/, March 2006.
- [11] D.R. Hush, and C. Wood, "Analysis of tree algorithms for RFID arbitration," Proc. ISIT 98, p.107, August 1998.
- [12] J.I. Capetanakis, "Tree algorithms for packet broadcast channels," IEEE Trans. Inform. Theory, vol.IT-25, no.5, pp.505–515, September 1979.
- [13] H. Vogt, "Multiple object identification with passive RFID tags," IEEE Inter. Conf. SMC

参考文献 58

- '02, October 2002.
- [14] B. Zhen, M. Kobayashi, and M. Shimizu, "Framed ALOHA for multiple RFID objects identification," IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, no.3, pp.991–999, March 2005.
- [15] C. Floerkemeier, and M. Wille, "Comparison of transmission schemes for framed ALOHA based RFID protocols," Proc. SAINT 2006 Workshops, pp.92–95, January 2006.
- [16] M. Wille, "Evaluation and optimization of RFID transmission control strategies," Master's thesis, Department of Computer Science Institute for Pervasive Computing, Federal Institute of Technlogy (ETH), 2005.
- [17] Y. Kawakita, and J. Mitsugi, "Anti-collision performance of Gen2 air protocol in random error communication link," Proc. SAINT 2006 Workshops, pp.68-71, January 2006.
- [18] J.Mitsugi, and H.Hada, "Experimental study on UHF passive RFID readability degradation," Proc. SAINT 2006 Workshops, pp.52-55, January 2006.
- [19] 杉本健一,三次仁,白石雅彦,中村修,村井純,"UHF 帯電池付きタグを利用した アプライドタグの読み取り範囲測定,"2007 信学ソ大(通信), no.B-20-16, p.395, September 2007.
- [20] J. Mitsugi, and Y. Shibao, "Multipath identification using steepest gradient method for dynamic inventory in UHF RFID," Proc. SAINT 2007 Workshops, p.24, January 2007.
- [21] J. Mitsugi, "Multipurpose sensor RFID tag," Proc. APMC 2006 Workshop on Emerging Technologies and Applications of RFID, no.WS04-4, pp.143–148, December 2006.
- [22] F.C. Schoute, "Dynamic frame length ALOHA," IEEE Trans. Commun., vol.COM-31, no.4, pp.565–568, April 1983.
- [23] W.T. Chen, and G.H. Lin, "An efficient anti-collision method for tag identification in a RFID system," IEICE Trans. Commun., vol.E89-B, no.12, pp.3386–3392, December 2006.
- [24] 川喜田佑介,三次仁,中村修,村井純,"RFID インベントリにおける推定タグ数を用いた動的フレーム ALOHA," 2007 信学総大(通信), no.B-5-142, p.556, March 2007.
- [25] J. Sanchez, and D.R. Smith, "Capture probability in rician fading channels with power control in the transmitters," IEEE Trans. Commun., vol.50, no.12, pp.1889–1891, December 2002.

参考文献 59

[26] I. Widipangestu, A. Jong, and R. Prasad, "Capture probability and throughput analysis of slotted ALOHA and unslotted np-ISMA in a Rician/Rayleigh environment," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.43, no.3, pp.457–465, August 1994.

- [27] M. Zorzi, "Capture probabilities in random-access mobile communications in the presence of Rician fading," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.46, no.1, pp.96–101, February 1997.
- [28] 川喜田佑介,三次仁,中村修,村井純, "RFID インベントリにおけるキャプチャ可能性", 2006 信学ソ大(通信), no.B-5-116, p.476, September 2006.
- [29] 川喜田佑介,三次仁,中村修,村井純,"キャプチャ効果を利用する UHF 帯 RF インベントリの高速化,"信学技報(SIS 研), vol.107, no.373, pp.53-56, December 2007.
- [30] 亀田卓,山口敦由,福與賢,中瀬博之,高木直,坪内和夫,"1 ビットフラグを用いた高速 RFID 識別方式,"信学論(A), vol.J89-A, no.12, pp.1057-1067, December 2006.
- [31] 肥塚八尋,桂潤,河合武宏,"UHF帯 RF タグの BLF(Bit Link Frequency) バラツキによる課題と、その対策案の提案,"信学技報(SIS研), vol.107, no.373, pp.49–52, December 2007.
- [32] 尾崎太亮,渡邊一希,山本正明,山添孝徳,"複数搬送波の同時供給による RFID 通信特性向上,"信学技報 (SIS 研), vol.107, no.373, pp.19-24, December 2007.
- [33] H.C. Liu, Y.T. Chen, and W.S. Tzeng, "A multi-carrier uhf passive RFID system," Proc. SAINT 2007 Workshops, p.21, January 2007.
- [34] Y. Kawakita, O. Nakamura, S. Wakayama, J. Murai, and H. Hada, "Rendezvous enhancement for conference support system based on RFID," Proc. SAINT 2004 Workshops, pp.280–288, January 2004.
- [35] ZigBee Alliance, "ZigBee specification (revision dated Q4/2007)," http://www.zigbee.org/en/spec_download/zigbee_downloads.asp, 2007.
- [36] 三次仁 ,"総論とパッシブ RFID 技術の動向 ," 電気学会誌 ,vol.126 ,no.8 ,pp.521–524 , August 2006.
- [37] 細矢良雄,電波伝搬ハンドブック,電波伝搬ハンドブック編集委員会(編),リアライズ社,1999.

付録A

仲上ライスフェージング環境における衝突 RF タグ数とキャプチャの 関係

キャプチャ可能性は、それぞれの RF タグの応答とそのリーダでの受信電力の関係で議論をすることができる ([25, 26, 27])。 はじめに、2 つの RF タグの応答が衝突することを考える。 RF タグとリーダは見通し関係にあるのでリーダの受信波電力 r の分布は式 (A.1) の仲上ライス分布による確率密度関数 (Probability Distribution Function, PDF) として次のようにあらわすことができる [37]。

$$PDF2(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0(\frac{rA}{\sigma^2})$$
(A.1)

ただし、 σ は仲上ライス分布の標準偏差、A は定常波の振幅、 I_0 は第 1 種の 0 次変形ベッセル関数である。以降の記述で PDFk の k は、同一スロットを選択した RF タグ数を意味する。PDF を特徴付けるものとして、定常波と散乱波の電力比はライス係数 K と呼ばれ、式 (A.2) で示されるライス係数 K で表すことができる。

$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2} \tag{A.2}$$

 $\frac{r}{\sqrt{(A^2+2\sigma^2)}}$ で正規化した電力と PDF2(r) による PDF の 1 例 (PDF2, $\sigma=0.7$, A=1, K=1) と、その累積分布関数 (Cumulative Distribution Function, CDF) の例 CDF2 を図 A.1 に示す。伝搬モデルが構築され PDF が決定できた場合、このグラフを用いてキャプチャ効果の有無を議論できる。この例では、希望波の正規化後電力の期待値を r_d 、干渉波との電力比 3dB でキャプチャが発生するとすると、 $CDF2(\frac{r_d}{2})$ の 2 倍(2 つの RF タグの

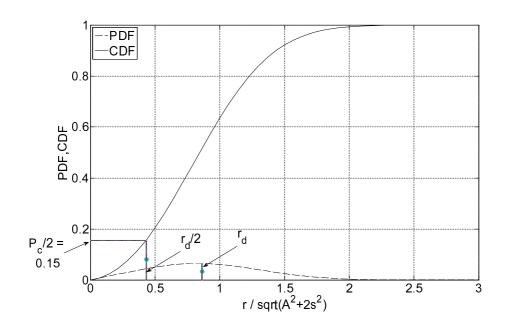


図 A.1 正規化した RF タグからの受信電力の確率密度関数 (PDF) と累積分布関数 (CDF) の例.

どちらが読み取れてもよいため) つまり 0.3 がキャプチャ率 P_c となる。

次に 3 つ以上の RF タグ応答が衝突する場合を議論する。2 つ干渉波のパケットの合計 の電力分布を PDF3 とすれば、式 (2.1) の畳み込みにより式 (A.3) を得る。

$$PDF3 = \lim_{x \to \infty} \int_0^x PDF2(x - y) \cdot PDF2(y) dy$$
 (A.3)

PDF3 から得た CDF を CDF3 とすれば、CDF3 のキャプチャ率 $P_c=0.0078$ となり CDF2(=0.3) に比して非常に小さい。同様にして求めた PDFk および CDFk を図 A.2 に示す。このグラフから、キャプチャ率の決定に支配的なのは CDF2 のみであり、CDF3 以降は実質的に無視できることが分かる。ライス係数 K を変更した場合でも同様に CDF2 が支配的である。また、CDF3 以降を考慮する場合でも、本稿で提案した手法に適用することも可能である。

以上をまとめると、PDF/CDF の議論からキャプチャ効果については干渉波のパケットが 1 つの場合、つまり k=2 の場合が支配的である。

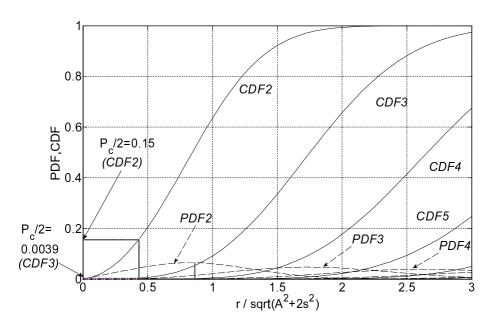


図 A.2 2 つ以上の干渉波パケットが希望波のパケットに衝突する場合の PDF および CDF のグラフ. 正規化した RF タグからの受信電力の確率密度関数 (PDF) と累積分布 関数 (CDF).

付録 B

実機実測におけるフレーム状況記録

本節では、第 3.4 節で示した、図 3.12 および 3.13 が図 3.4-3.6 と比べてアンチコリジョン所要スロットに開きがある点について、実際のフレーム状況記録を参照しながら分析する。

以下に提案手法を用いて実機実測の際に記録したインベントリのフレーム状況の一例を示す。150 個の RF タグを配置し、結果的には 105 個がアンチコリジョン対象の RF タグとなったインベントリである。この記録は、1 行が 1 フレームを意味し、インベントリの開始から終了までのすべてのフレームを記録されている。各行の凡例を表 B.1 に示す。インベントリの最終行に、アンチコリジョン対象の RF タグ数、アンチコリジョン所要時間(ms)、アンチコリジョン所要スロット数がカンマ区切りで出力されている。

この記録から、フレーム状況に応じてフレーム長を伸張しその後短縮することがおおむねできていると理解できる。しかし、何らかの原因で各状況判定に誤差が生じていると考えられ、24 フレーム目 (*印の行、26 行目に相当) 以降からこの傾向は顕著となる。このため、インベントリがなかなか収束せず ((*) 以降のフレーム長の合計は 191 slot)、これによりシミュレーション値と実測値の隔たりが生じたと考えられる。現在、この点について

表 B.1 フレーム状況記録の凡例.

L	フレーム長
L_s	成功スロット数
L_e	受信エラースロット数
L_n	空スロット数
L_c	衝突スロット数

はリーダライタ製造メーカと対応を検討中である。

フレーム状況記録

```
1
     ##
          Proposal
 2
     ##
          L, L_s, L_e, L_n, L_c
                 0,
                        0,
                               5,
         16,
 3
     #
                                     11
                 0,
 4
     #
         32,
                        2,
                              12,
                                     18
                                     29
22
21
                12,
                        1,
                              22,
 5
     #
         64,
 6
7
         64,
                14,
                        2,
                              26,
     #
         64,
     #
                        4,
                 9,
                              30,
 8
         64,
     #
                 7,
                        4,
                                     23
                              30,
 9
     #
                        1,
                              33,
                                     20
         64,
                10,
                12,
     #
                              30,
                                     21
10
         64,
                        1,
     #
                                      9
11
         64,
                              44,
                10,
                         1,
     #
                                     12
12
         32,
                 2,
                        2,
                              16,
13
     #
                                      5
7
6
         32,
                              20,
                 6,
                        1,
     #
                               7,
7,
14
         16,
                 2,
                        0,
     #
15
                 2,
         16,
                        1,
     #
                 3,
16
                        0,
                               6,
                                      7
9
5
5
6
         16,
     #
         16,
                 2,
17
                        2,
                               3,
18
     #
         32,
                        2,
                              21,
                 4,
                 0,
19
     #
                              10,
         16,
                        1,
                 0,
20
     #
         16,
                        2,
                               8,
                               8,
         16,
                 2,
21
     #
                        0,
                                      6
5
4
7
3
4
     #
         16,
                 1,
22
                        0,
                              10,
                        1,
         16,
                 2,
23
                               9,
     #
                               8,
         16,
                 1,
24
                        0,
         16,
                 1,
                              11,
25
                         1,
     #
                                         (*)
          8,
                        0,
26
                 0,
                               4,
     #
                 0,
                        0,
                                      4
           8,
27
                               4,
     #
                 0,
                               3,
                                      4
           8,
                        1,
28
                               5,
     #
          8,
                 0,
                                      3
29
                        0,
                 0,
     #
          8,
                                      4
30
                        0,
                               4,
          8,
                 0,
     #
31
                        0,
                               5,
                                      3
5
2
3
          8,
                               3,
32
     #
                 0,
                        0,
33
     #
         16,
                 1,
                        0,
                              13,
          8,
                 1,
                               4,
34
     #
                        0,
                               4,
          8,
                 0,
35
     #
                        0,
                                      423323122201
     #
          8,
                               6,
36
                 0,
                        0,
                        0,
     #
          8,
37
                 0,
                               5,
                 0,
                        0,
                               5,
38
     #
           8,
     #
                 0,
                               6,
39
           8,
                        0,
     #
40
                               5,
7,
2,
2,
           8,
                 0,
                        0,
     #
41
                 0,
           8,
                        0,
     #
42
           4,
                 0,
                        0,
     #
43
           4,
                        0,
                 0,
     #
44
           4,
                 0,
                        0,
                               3,
2,
     #
45
           4,
                        0,
                  1,
     #
46
                 0,
           3,
                        0,
     #
                               2,
47
           3,
                                      1
2
2
1
                 0,
                        0,
48
     #
           2,
                 0,
                        0,
                               0,
     #
                        0,
                               2,
49
           4,
                 0,
           4,
                 0,
50
                        0,
                 0,
51
     #
                                      1
           4,
                        0,
                        0,
     #
           4,
52
                 0,
     # Tag, Duation, Slot
53
     105, 810, 938
```

付録C

RF タグによるリターン回線の パケットエラー率計測手法

従来、リターン回線でのパケットエラーを計測するには、RF タグで観測したパケットの送信数と RFID リーダで観測したパケットの受信数が必要であった。RF タグとして、BAP[21] を用いる場合、送信パケット数を記録することはできるが、RFID リーダが受信に成功したパケット数を取り出すことは RFID リーダの改修を伴う。したがって、現実にはこの方法でリターン回線のパケットエラー率を測定することは難しい。

本節では、著者が考案し、実験で用いた (図 2.16) RF タグ (BAP) 内のステートマシンを 改変することで、BAP のみでリターン回線のパケットエラー率を計測する手法について 述べる。

提案する手法では、RF タグのみを用いてリターン回線で主要なパケットである RN16 のパケットエラー率を計測できる。RF タグのみでリターン回線のパケットエラー率を計測するには、RFID リーダで正常に受信された RN16 のパケット数を RF タグ内部で推測する必要があり、C1G2 のプロトコルに注目してこれを行った。図 C.1 に C1G2 プロトコルの RN16 パケットに関するタイムスペースチャートを示す。この図から、フォワード回線にエラーがない状態では、RN16 パケットが正常に RFID リーダに受信された後に、RF タグは ACK を受信できることがわかる。RF タグにおいて、RN16 パケットの送信数とACK の受信数を計測すれば、リターン回線のパケットエラー率を RF タグのみで計測可能で、リターン回線のパケットエラー率 $PER_{ReturnLink}$ は、式 (C.1) で示される。ただし、 N_{ACK} は、総 ACK 受信数 N_{RN16} は、総 RN 応答数である。

$$PER_{ReturnLink} = 1 - \frac{N_{ACK}}{N_{RN16}}$$
 (C.1)

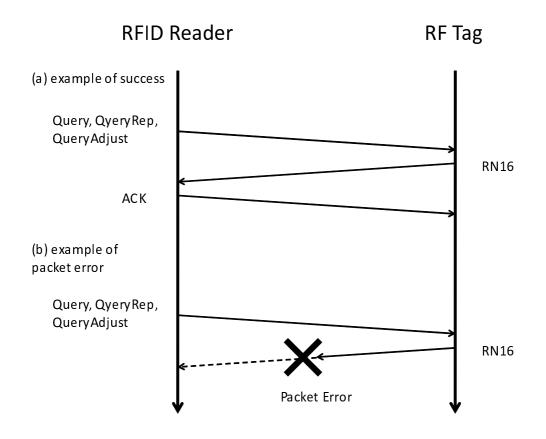


図 C.1 C1G2 プロトコルの RN16 パケットに関するタイムスペースチャート. (a) RN16 が正常に受信された場合 (b) RN16 がリターン回線でパケットエラーになる場合.

図 C.2 にリターン回線のパケットエラー率計測で使用する装置概略を示す。方向性結合機を用いてリターン回線にのみ信号発生器で生成した干渉を適用した。フォワード回線は、同軸ケーブルでリターン回線と別回線とし、エラーなし回線である。RF タグエミュレータとして、BAP[21] を内部のプログラムを改変して使用した。RF タグエミュレータは、ICE を介してデバッガの動作する PC に接続されている。

以下に疑似コードを示す。ExecCommand_QueryRep、ExecCommand_Query、および ExecCommand_Adjust は、QueryRep, Query, QueryAdjust コマンドの受信時に実行される関数である。パケットエラーの計測に使用する変数は successAck と totalRN16 の2 つである。successAck は、インベントリ実行中に受信した ACK パケットの総数を表し、ACK 受信時にインクリメントされる (29 行目)。totalRN16 は、インベントリ実行中に応答した RN16 パケットの総数を表し、RN 応答時にインクリメントされる (13, 43, 58 行目)。この 2 つの変数および式 (C.1) をデバッガ内で使用することにより、リターン回線のパケットエラー率が計測できる。

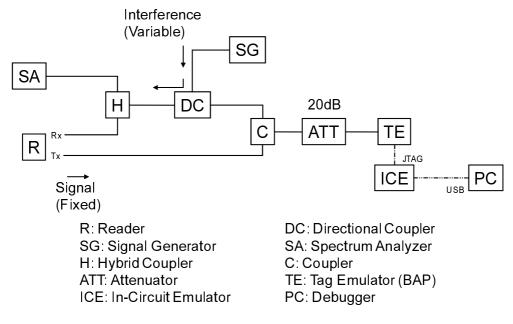


図 C.2 リターン回線のパケットエラー率計測の装置概略図.

```
// ...snip...
2
    volatile static unsigned successAck;
3
    volatile static unsigned totalRN16;
4
    // QueryRep コマンド処理
    void ExecCommand_QueryRep( void )
5
6
7
      // ...snip...
// ------ ステート分岐 ---
8
9
       switch( g_CurState.state ){
      // ...snip...
case arbitrate:
10
11
         if( g_CurState.SlotCnt == 0 ){ //slot カウンタが 0
12
13
           totalRN16++; // RN16 応答数をインクリメント
14
           // ...snip...
15
           g_CurState.state
                              = reply;
16
           return;
17
18
            ...snip...
19
20
    }
21
    // Ack コマンド処理
    void ExecCommand_Ack( void )
22
23
24
      // ...snip...
       // ----- ステート分岐 ---
25
26
      switch( g_CurState.state ){
27
        // ...snip...
28
      successAck++; // ACK 受信数をインクリメント
29
30
      // ...snip...
       g_CurState.state = acknowledged;
31
32
      return;
```

```
33
34
    // Query コマンド処理
35
    void ExecCommand_Query( void )
36
      // ...snip...
37
      .,
// ----- ステート分岐 ------
38
39
      switch( g_CurState.state ){
      case ready:
40
                  case arbitrate: case reply :
        // ...snip...
41
        if( g_CurState.SlotCnt == 0 ){ //slot カウンタが 0
42
          totalRN16++; // RN16 応答数をインクリメント
43
44
          // ...snip...
45
46
        // ...snip...
47
48
      // ...snip...
49
    // QueryAdjust コマンド処理
50
    void ExecCommand_QueryAdjust( void )
51
52
      // ----- ステート分岐 ------
53
54
      switch( g_CurState.state ){
55
      case arbitrate:
                                      case reply:
56
        // ...snip...
        if( g_CurState.SlotCnt == 0 ){ //slot カウンタが 0
57
58
          totalRN16++; // RN16 応答数をインクリメント
59
          // ...snip...
60
        // ...snip...
61
62
      // ...snip...
63
64
65
    // ...snip...
```