

## 2.4GHz 無線 LAN を用いた 同期網間接続装置の開発と評価

福家 直樹 杉山 敬三 篠永 英之

株式会社 KDDI 研究所  
〒356-8502 埼玉県上福岡市大原 2-1-15  
E-mail: {fuke, sugiyama, shinonaga}@kddilabs.jp

**あらまし** 2.4GHz 無線 LAN を介し、デジタル同期回線を相互接続するインタフェース変換装置を開発した。本稿では一次群速度インタフェースを相互接続するネットワークを対象とし、装置概要、無線 LAN パケットへのフレーム変換方法、及びエラー制御手法等について報告する。無線 LAN を用いた場合の特性を向上させるため、同期回線へ連続的にデータ送出を行うための内部処理、再送パケットの複数送信や送信タイミングの変更等の改善手法を提案し、その特性評価を行った。この結果、対向の連続動作試験ではエラーフリーの特性が得られ、一定量の干渉トラヒックが存在しても規定値を満足することを確認した。

**キーワード** 無線 LAN , 同期網 , インタフェース変換装置 , CFO-SS

### Development and Evaluation of Interface Converter to Interconnect Separate Synchronous Networks using 2.4GHz Wireless LAN

Naoki FUKE, Keizo SUGIYAMA, Hideyuki SHINONAGA

KDDI R&D Laboratories Inc.  
2-1-15, Ohara, Kamifukuoka, Saitama, 356-8502 Japan  
E-mail: {fuke, sugiyama, shinonaga}@kddilabs.jp

**Abstract** We have developed an interface converter to interconnect digital synchronous networks using 2.4GHz wireless LAN. In this report, a frame translation method between primary rate interface and Ethernet interface, an error recovery function and a function of transmitting continuous data into synchronous network are described. We proposed a re-transmission method of two or more same packets and a timing change method of packet transmission to improve error performance of an interconnected synchronous network. A long-time operation shows that no error is counted when the two wireless LAN devices are directly connected, and even under interference environment bit error performance meets the recommended value.

**Keywords** Wireless LAN , synchronous network, interface converter, CFO-SS

#### 1. はじめに

2.4GHz 無線 LAN は特別な電波免許や通信費が不要であるため、屋内で PC と LAN を接続する回線としての利用、屋外での有線専用線の置き換えや広域無線ネットワークの構築に用いられている。これらは主にデータ伝送を行う通信回線として用いられ、音声通話（電話）に関しては従

来からの回線交換網が使用される場合がほとんどである。近年、回線交換網での音声通話に替わり、LAN やインターネット経由で音声データを送受信する VoIP (Voice over IP) 技術を用いた音声通話システムが導入されている場合もあるが、まだ大部分はデータ伝送のための LAN 回線と電話用の回線交換網を併用していることがほとんどである。

VoIP 技術の進歩や LAN 回線の伝送速度向上により、将来的には電話網が全てインターネット網に置き換わる可能性もあるが、現時点でその時期は不明である。ここで、電話機や交換機 (PBX) 等回線交換網の設備は維持したままで回線のみ LAN を用いることが出来れば、コスト低減や設備の置換を進めることが可能となる。

今回、上記目的のため、電話回線や専用線が使用する同期網を LAN 回線を通じて相互接続するインタフェース変換装置を開発した。特に、本装置では LAN 回線として無線 LAN を用いることを想定し、有線に比べて回線品質の劣る無線 LAN を用いた場合にも、同期網の品質を維持するよう必要な機能を実装した。

本稿では、2.4GHz 無線 LAN を用いて同期網を相互接続するインタフェース変換装置について、その機器構成、データ中継手法、エラー制御手法を述べる。次に、無線 LAN 経由のデータ伝送における課題とその解決方法を述べ、最後に特性評価を行った結果を報告する。

## 2. ネットワーク構成と機器の仕様

### 2.1 基本ネットワーク構成

図 1 に示すように、本稿で述べる装置開発では、同期網のうち一次群速度インタフェース (PRI : Primary Rate Interface, 1544Kbit/s) 回線を LAN 回線により相互接続するネットワークを対象とした。本稿では LAN 回線として無線 LAN を対象として記述しているが、有線 LAN、無線 LAN 双方に適用可能である。PRI 回線と LAN 回線では物理インタフェースが異なるが、図 1 のようにインタフェース変換装置を介在すれば、PRI 回線のデータを Ethernet パケットに変換し無線 LAN を用いた相互接続が可能となる。また、HUB を用いれば有線 LAN と混在させたネットワーク構成も可能となる。

PRI 回線が送受信を同時に行う全二重回線であるのに対し、無線 LAN は半二重回線であるため、無線 LAN 区間では PRI 回線速度の 2 倍、すなわち 3Mbit/s 以上の伝送容量が必要である。更に、再送トラヒックや有線 LAN 間のデータトラヒックが加わることを想定し、無線 LAN の伝送容量は余裕を持たせる必要がある。

ネットワークでは回線品質を向上させるため通常エラー制御が行われるが、図 1 におけるエラー制御の形態は、無線 LAN 装置間、インタフェース変換装置間、あるいは双方を併用する形が考えられる。無線 LAN はアクセス制御方式として

自律分散型の CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) を採用しているため、無線 LAN 装置間のエラー制御のみでは、遅延や揺らぎの補償が難しい。また、二重のエラー制御は回線品質の改善には有効であるが、伝送遅延を増大させる恐れがある。このため、本構成ではインタフェース変換装置間のみでエラー制御を行い、無線 LAN 装置でのエラー制御は行わないことを前提とする。

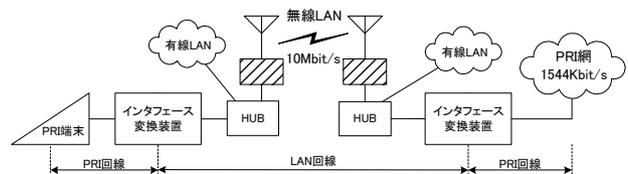


図 1 基本ネットワーク構成

### 2.2 インタフェース変換装置の仕様

インタフェース変換装置の基本構成を図 2、ハードウェア仕様を表 1 に示す。PRI 回線側は本変換装置が網からのクロックを受け従属同期する TA モード、及び本装置が接続される機器に対しクロックを送出する NT モードを実装している。また、Ethernet 回線側は 10/100Base-T のインタフェースを有しており、無線 LAN 装置に接続する。PRI 回線と Ethernet 回線の速度差は Ethernet 送受信バッファで吸収され、各回線の伝送速度に応じてデータ送出行を行う。対向側のインタフェース変換装置は MAC アドレスで識別している。

PRI 回線における伝送速度は、端末側から見た場合 192 ~ 1536 Kbit/s の 7 種類がある。ただし、これらは PRI 1 フレーム (24 タイムスロット) のうち幾つのタイムスロットを使用するかで決まる論理伝送速度であり、論理伝送速度によらず物理伝送速度は 1544 Kbit/s である。PRI 網では最小精度  $1 \times 10^{-11}$  の高精度クロック源が使用されている [1][2]。しかし、本装置に実装するクロック精度には限界があるため、網クロックによる同期化が中断された場合に供給されるクロック精度規定値 ( $4.6 \times 10^{-6}$ ) を満たす  $1 \times 10^{-7}$  としている。

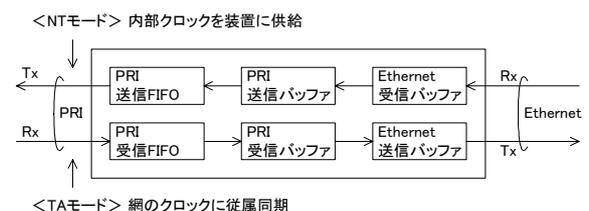


図 2 インタフェース変換装置の基本構成

表 1 インタフェース変換装置の仕様

物理伝送速度	1544 Kbit/s
論理伝送速度	192, 256, 384, 512, 768, 1152, 1536 Kbit/s
ユーザ - 網インタフェース	JT-I431-a
クロック精度	$1 \times 10^{-7}$
同期方法	網への従属 / 内部クロック
外形寸法	183(W) × 129(D) × 44(H) [mm]

### 2.3 無線 LAN 機器の仕様

本構成で用いた無線 LAN は、KDDI 研究所が開発した伝送速度 10Mbit/s の CFO-SS 無線システム (CFO-SS10A) である [3][4]。表 2 に CFO-SS10A の基本仕様を示す。本装置にはウィンドウ制御方式により伝送効率を向上させる機能やエラー制御機能が実装されているが、2.1節で述べた理由によりこれらの機能は用いていない。また、実効伝送速度 (Ethernet フレームの処理能力) は約 8Mbit/s である。

表 2 CFO-SS10A の基本仕様

変調方式	CFO-SS (Carrier Frequency Offset - Spread Spectrum) 方式
使用周波数帯	2,400 ~ 2,483.5 MHz 2,471 ~ 2,497 MHz
チャネル帯域幅	26 MHz
チャネル数	4 チャネル
伝送速度	10 Mbit/s
インターフェース	10Base-T(Half / Full) 100Base-Tx(Half)
空中線電力	0.082 mW/MHz
アンテナ利得	24 dBi
アクセス制御	CSMA/CA

## 3. データ伝送手順

### 3.1 フレーム変換手順

図 3 に PRI 回線のビット列から Ethernet パケットに変換する手順を示す。PRI 回線のビット列を PRI 1 フレーム毎に変換装置でバッファリングし、一定フレーム数蓄積されると Ethernet パケットにカプセリングした後、対向の変換装置に送信する。受信側変換装置では再び PRI ビット列に戻した後、PRI 回線に送信する。PRI 回線は全二重回線であるため、上記の送信・受信処理を双方の変換装置とも同時実行している。また、変換装置間は無線 LAN を前提としているため、Ethernet パケットに設けたヘッダにより再送制御・順序制御を行い、回線品質劣化の場合も誤りを最小に抑えている。フレーム伝送手順については次節で詳細説明を行う。

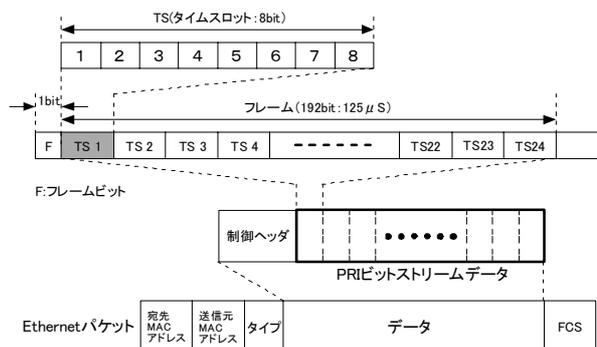


図 3 フレーム形式の変換

PRI 回線の論理伝送速度は最大 1536Kbit/s (24 タイムスロット) であるが、論理伝送速度がこれより小さい場合、有効なデータの存在しないタイムスロットは Ethernet パケットに変換せず、無線区間の無駄なトラフィック増加を抑えた。

制御ヘッダには、パケット識別子 (DATA / ACK / NAK / SYNC) 受信側に対するコマンド (ACK / NAK) パケットシーケンス番号、及び上位網からのアラーム情報等を含める。PRI 回線は全二重回線であるため、ACK / NAK 情報は個別パケットではなくデータパケットに重畳させる構成を採用した。

### 3.2 インタフェース変換装置間のデータ伝送

インタフェース変換装置間では、ウィンドウ制御方式による効率的なデータ伝送、及び ACK/NAK 返信によるエラー制御や順序制御を行っている。以下、これらの手順を説明する。

#### 3.2.1 シーケンス番号の初期化

装置起動時には対向するインタフェース変換装置間において、送信側の送信データ番号と受信側の次受信予定シーケンス番号を同期させる必要がある。このため、図 4 に示すように SYNC パケットの送受信を行う。

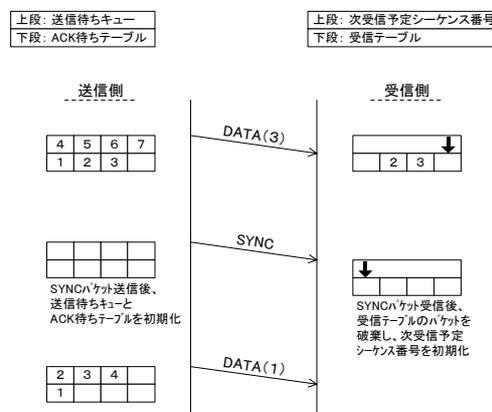


図 4 シーケンス番号の初期化手順

送信側装置は SYNC パケットを送信後、

Ethernet 送信バッファ中の送信待ちキューと ACK 待ちテーブルを初期化する。受信側装置は SYNC パケット受信後、受信パケットテーブルに存在するパケットを全て破棄し、次受信予定シーケンス番号を初期化する。ただし、PRI 送信バッファに送出したデータは消去しない。

### 3.2.2 正常時のデータ伝送

図 5 の前半にパケット消失の無い正常時のデータ伝送手順を示す。

送信側では、PRI 受信バッファに規定フレーム数の PRI データが蓄積されることを契機として Ethernet 回線へのパケット送出を開始する。送信待ちキューにデータがあれば、パケットのシーケンス番号、受信側インタフェース変換装置の MAC アドレス、及び制御ヘッダを設定して Ethernet 回線に送信し、ACK 待ちテーブルに移す。受信側では、受信パケットのシーケンス番号が次受信予定シーケンス番号と一致すれば ACK 返信を行う。引き続き、受信データを PRI 回線の送信待ちキューに送出し、次受信予定シーケンス番号を 1 増やす。送信側では、送信パケットに対する ACK を受信後、該当データをテーブルから消去し、次のデータ送信を行う。

なお、データ伝送効率向上のため、1 パケット毎に ACK 返信を行うのではなく、一定パケット数までは ACK を待たずに次のパケットを送出するウィンドウ制御方式を実装している。

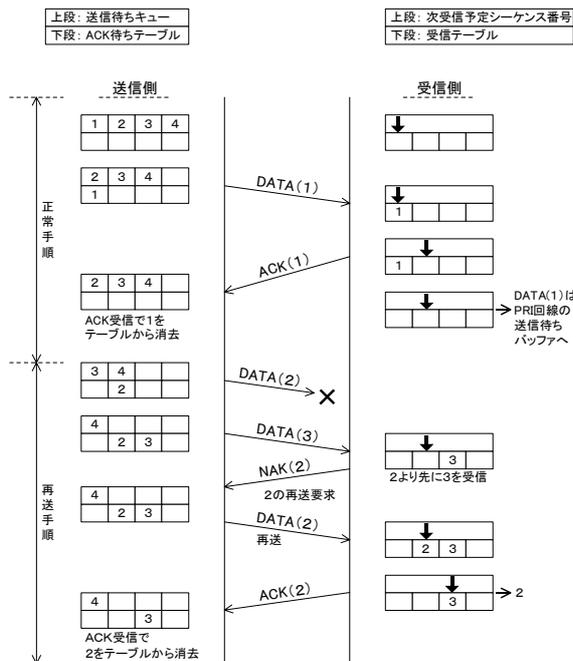


図 5 パケット伝送手順(正常/再送)

### 3.2.3 パケット消失時のデータ伝送

図 5 の後半にインタフェース変換装置間でデータパケットが消失した場合の再送手順を示す。

送信側では、DATA(2)及びDATA(3)を送信し、ACK 待ちテーブルに移す。

受信側では、次受信予定シーケンス番号が 2 であるのに対し、シーケンス番号の異なる DATA(3)を受信したため、DATA(2)の再送要求である NAK(2)を送出する。

送信側では、ACK 待ちテーブルにある DATA(2)を再送し、受信側から ACK(2)を受信することによりデータ送信を完了する。

パケット再送は NAK 受信毎に行われ、シーケンス番号が一巡し、同一シーケンス番号のデータにより上書きされるまで行われる。

## 4. 無線 LAN 経由のデータ伝送

### 4.1 無線 LAN のアクセス制御

無線 LAN 区間では、CSMA 機能によりパケット送信が行われる。CSMA では、パケット送信前に通信チャンネルをモニター(キャリアセンス)し、他の無線局がパケット送信を行っていない場合は自局が送信を行う。もし、他局がパケット送信を行っている場合は一定時間待機し、再度送信を試みる手順が採られている。

このように、対向する無線 LAN 装置間では同時にパケット送信を行うことは出来ず、交互に送信する半二重手順である。キャリアセンスは送るべきパケットが生じた際に行われるため、図 6 に示すように対向する装置が同時にパケットを送信し、無線 LAN 区間での衝突が発生する可能性がある。

パケット衝突が発生した場合は当該パケットは消失するが、次のパケット送信は無線 LAN 装置がランダムに決定するバックオフ時間だけ待機した後行われる。図 6 の例では、装置 2 のバックオフ時間が短いため、先にパケット送信を行う。装置 1 がパケット送信を試みる時間には装置 2 がパケット送信中であるため待機し、装置 2 のパケット送信完了後、装置 1 がパケット送信を行う。

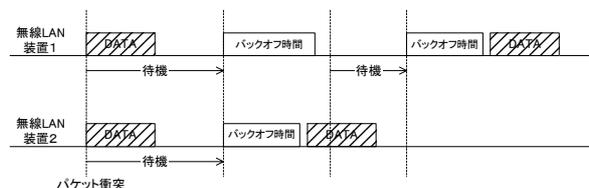


図 6 無線 LAN パケットの衝突

なお、IEEE802.11 標準の無線 LAN では、RTS/CTS によるアクセス制御方式が採用されているが、RTS パケットの衝突は前記と同様に発生する可能性がある。

#### 4.2 無線 LAN を用いる場合の課題

LAN 回線として無線 LAN を用いた場合は無線 LAN の自律分散的なアクセス制御方式のため、3.2節で述べた再送手順では十分な回線品質が得られない場合が見られた。

この原因は無線 LAN パケットの衝突によるインタフェース変換装置間の再送のためである。この再送により、インタフェース変換装置内で PRI 回線に送るべきデータがなくなる場合、無線 LAN 区間の衝突が連続的に発生し、無線パケットが消失する場合、の二通りがあることが判明した。このため、本装置に以下で述べる改善手法を実装した。

#### 4.3 改善手法 1：PRI 回線へのデータ送出手順

##### 4.3.1 正常時のデータ処理手順

インタフェース変換装置における、Ethernet パケット受信から PRI 回線へのデータ送金の流れを説明する。

図 7 に示すように、Ethernet 回線から受信したパケットは、シーケンス番号順に並べ替えられた後、受信バッファに格納される。その後、PRI 送信バッファ、PRI 送信 FIFO を経由して PRI 回線に送出される。なお、装置起動時などは、Ethernet 受信バッファに規定量(初期バッファサイズ)だけデータが蓄積された後、Ethernet 受信バッファから PRI 送信バッファへのデータ移動が行われる。PRI 回線は全二重であるため、図 2 で示したように送信バッファと受信バッファをハードウェア的に別構成とし、処理負荷の軽減を図っている。

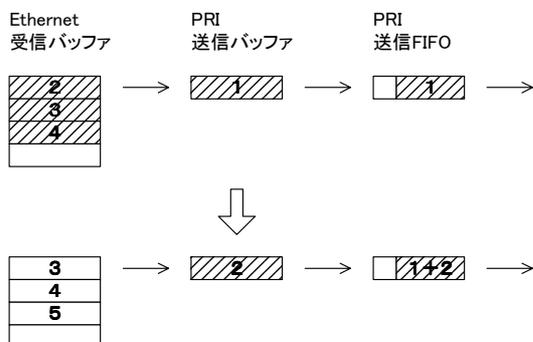


図 7 正常時のデータ処理手順

##### 4.3.2 Ethernet パケット再送時の処理手順

図 8 に示すように、無線 LAN 区間でパケット

再送が行われている場合についても、PRI 回線に対しては連続送信が行われるため、徐々に Ethernet 受信バッファが減少してくる。Ethernet 受信バッファが空になるまでの期間に無線 LAN の再送が完了し、シーケンス番号の連続したパケットが届いていれば、その時点で Ethernet 受信バッファは初期バッファサイズまで回復することになる。よって、初期バッファサイズを最適に設定することが重要である。

無線 LAN 帯域を有効利用するためには Ethernet パケットのデータサイズを最大値(1500 バイト)にするのが望ましい。一方、本装置で用いた PRI トランシーバ IC の送信 FIFO サイズが約 800 バイト(4ms 分)であるため、最大パケットサイズを用いると、再送が連続した場合に次に正常なパケットが届くまでの時間間隔が長くなり、送信 FIFO が空になる恐れがある。

以上のことを考慮し、初期バッファサイズと Ethernet パケットに変換する PRI データは 40 フレーム分(960 バイト)とした。

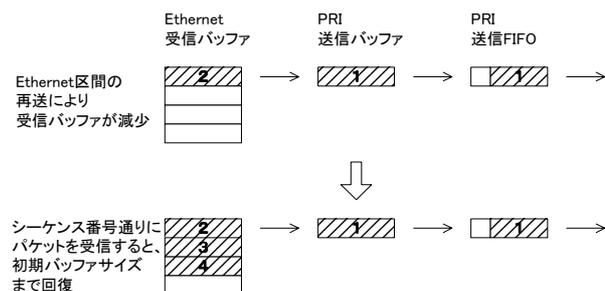


図 8 Ethernet パケット再送時の処理手順

##### 4.3.3 Ethernet 受信バッファが空の場合の処理手順

図 9 に示すように、LAN 回線断や再送処理により Ethernet 受信バッファが空になると、PRI 回線に送出するデータが空に近づく。このような場合は PRI 送信 FIFO の残りデータが一定量(64 バイト)を下回ると、既に送信したデータから初期バッファサイズ分のデータを Ethernet 受信バッファにコピーし、データ送信を継続する処理を行う。なお、強制的に送信するデータとしてアイドルパターンを用いることも考えられるが、データパターンの似た送信済みデータを用いた。

Ethernet 回線から正常なデータが届き始めるとコピーしていたデータを破棄し、受信したシーケンス番号から受信処理を継続することにより早い段階でのエラー復旧を可能とした。また、この際には Ethernet 受信バッファサイズを拡大する処理を行い、受信バッファが空になるまでの時

間を長くし、エラー発生の可能性を小さくしている。

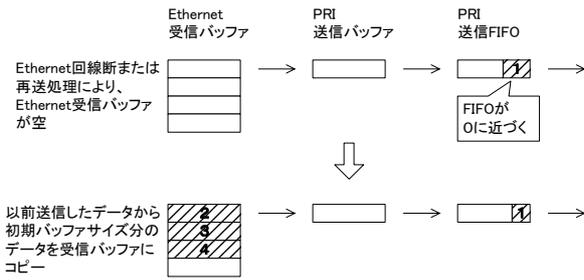


図 9 Ethernet 受信バッファが空の場合の処理

#### 4.4 改善手法 2：無線 LAN でのフレーム伝送手順

##### 4.4.1 連続的なパケット衝突の問題

インタフェース変換装置では PRI 回線から規定数のフレームを受信することを契機として Ethernet パケット送信を行うが、このタイミングは PRI クロックにより決まる。インタフェース変換装置のクロック精度は網のクロック精度より劣るため、対向するインタフェース変換装置でのデータ送受信タイミングは、一致している状態とずれている状態が発生し、この 2 つの状態は周期的に変化することになる。

図 10に示すように、対向するインタフェース変換装置での送出タイミングがずれている状態では無線区間でのパケット衝突が少ない。逆に、送出タイミングが一致している状態では、無線 LAN 装置が無線区間に対して同時にパケット送信を試みることとなり、パケット衝突が発生する可能性が高くなる。無線 LAN パケットの衝突が起きても、対向するインタフェース変換装置間では NAK によるパケット再送を行うが、送出タイミングが一致している状態では、続けてパケット衝突が発生する可能性が高くなる。

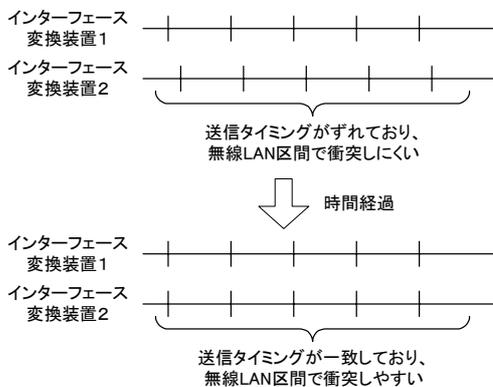


図 10 パケット衝突

##### 4.4.2 再送パケットの複数送信

前記の問題点を解決するため、NAK によるパケット再送時に次の機能を実装した。NAK パケットを受信した場合は、図 11(a)に示すように、再送要求のあったパケットを複数送信する。双方のインタフェース変換装置の送信タイミングが一致している状態では、最初の再送パケットは無線 LAN 区間で消失する可能性が高い。しかし、引き続いて送られる再送データパケットは無線 LAN 装置のバックオフ時間の違いにより、無線 LAN 区間で衝突せず対向側に届く可能性が高くなる。

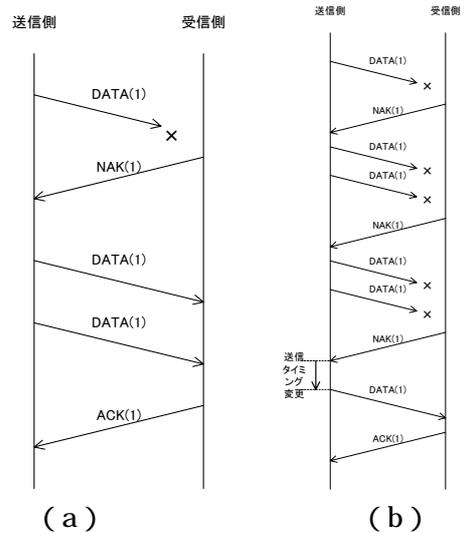


図 11 再送パケットの複数送信とタイミング変更

##### 4.4.3 送信タイミングの変更

前記のパケット再送手順を実施しても NAK が連続して発生する場合は考えられる。この場合は、対向するインタフェース変換装置での送出タイミングを変更することによりパケット消失の低減を図る。具体的には、図 11(b)に示すように、パケット消失による NAK パケット受信が一定回数（図では 3 回）継続した場合は、パケット送出タイミングを変化させる。変化させる時間は、デジタル同期回線のクロック時間の規定倍や、Ethernet 回線の最小パケットサイズに相当する時間などが可能であり、事前に設定する。この送出タイミング変化後もパケット消失状況に変化が無い場合、すなわち、NAK パケット受信を一定回数継続する場合は、その都度送出タイミングを変化させる機能を実装した。

## 5. 特性評価

### 5.1 基本特性

#### 5.1.1 連続動作試験



もう1対向を干渉トラヒック用としてPC 端末間で連続データ送信を行った。干渉トラヒックのパケットサイズはインタフェース変換装置間のパケットサイズと同一とした。無線 LAN 間は Hybrid により信号を合成/分配し、干渉波信号レベルに対する希望波信号レベルの比(C/I)をパラメータとしてデータ測定を行った。

測定結果を図 15に示す。C/I の値により多少の違いはあるものの、ほぼ同様の傾向を示している。これは、無線 LAN のメディアアクセス方式として CSMA が採用されており、ある閾値以上の電波が受ければ送信を延期するため、干渉波信号のレベル差による違いが見られなかったものと思われる。干渉トラヒック存在下においても、750Kbit/s 程度までのトラヒックであれば、インタフェース変換装置間のビット誤り率は前述の規定値 ( $4.8 \times 10^{-7}$ ) を満足しており、実環境下において用いても問題ないことが分かる。

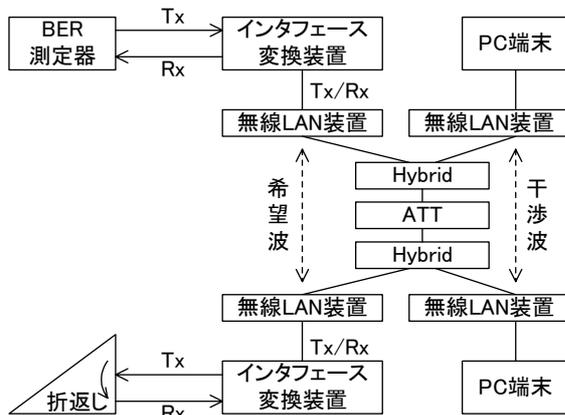


図 14 干渉トラヒック存在時の特性測定構成図

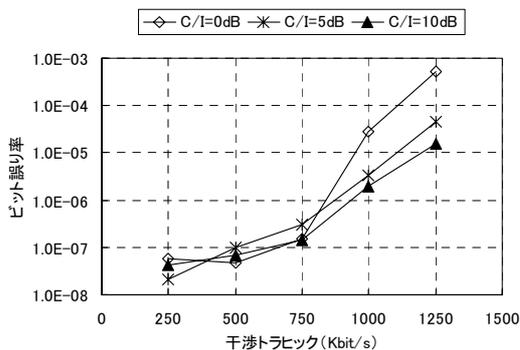


図 15 干渉トラヒック存在時の特性

## 6. まとめ

本稿では、無線 LAN を介し、デジタル同期網を相互接続するインタフェース変換装置に関

し、機能概要と無線 LAN の特性に応じたデータ伝送手順の改善手法について述べた。特性試験の結果、単体動作には問題なく、一定量の干渉トラヒックが存在しても規定値を満足することを確認した。最後に日頃ご指導頂く(株)KDDI 研究所浅見所長、松島副所長、水池取締役に感謝する。

## 文 献

- [1] TTC 標準 JT-I431, “ISDN 一次群速度ユーザ・網インタフェースレイヤ 1 仕様”
- [2] TTC 標準 JT-I431-a, “専用線一次群速度ユーザ・網インタフェースレイヤ 1 仕様”
- [3] H. Ishikawa and H. Shinonaga, “Design of Carrier Frequency Offset-Spread Spectrum (CFO-SS) System Using 2.4 GHz ISM Band,” IEICE Trans. on Fundamentals, pp.2669-2676, Vol. E82-A, No.12, Dec. 1999.
- [4] 福家、石川、南園、篠永, “CFO-SS10A : 2.4GHz 帯 ISM バンドを用いた 10Mbit/s CFO-SS 無線アクセスシステム”, 信学総大, 2000.
- [5] 平田、稲垣、高畑、安田、小川, “プレジオクロナス網間接続装置の開発”, 国際通信の研究, No.114, pp.719-733, Oct. 1982.
- [6] ITU-T Recommendation G.826.
- [7] ITU-T Recommendation G.828.
- [8] ITU-R Recommendation F.1492-2.
- [9] “FWA デジタルデータ伝送サービスのインタフェース”, KDD ウィンスター, 2000.
- [10] ITU-T Recommendation G.114.
- [11] Thomas J. Kostas et al., “Real-Time Voice Over Packet-Switched Networks,” IEEE Network, Jan/Feb, 1998.