

## CDMA2000 1xEV-DO/無線 LAN 中継装置 の開発と静止・移動環境下の特性評価

福家 直樹 泉川 晴紀 杉山 敬三 野原 光夫

株式会社 KDDI 研究所 YRP リサーチセンター  
〒239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 7-1 YRP3 番館  
E-mail: {fuke, izumikawa, sugiyama, nohara}@kddilabs.jp

あらまし CDMA2000 1xEV-DO 回線を無線 LAN 中継することにより、屋内等の不感地帯からのネットワークアクセスを可能にし、あるいはスループット向上を図る手法を提案する。本稿では、まず回線設計の観点から検討を行い、提案手法が 1xEV-DO の不感地対策やセルサイズ拡大に有効であることを確認した。次に、実際に中継装置の試作を行い、静止環境・高速移動環境における特性評価を行った。静止環境での測定結果により、提案中継手法の有効性、特に 1xEV-DO の低 RSSI 領域でのスループット向上に著しい効果があることを確認した。更に、高速移動環境下での評価を行い、車両内部においても中継手法が有効に働くことを検証した。

キーワード CDMA2000 1xEV-DO, 無線 LAN, 中継装置, 異種メディア

### Development of CDMA2000 1xEV-DO/Wireless LAN Gateway and Its Performance Evaluation in Static/Mobile Environment

Naoki FUKU, Haruki IZUMIKAWA, Keizo SUGIYAMA, Mitsuo NOHARA

YRP Research Center KDDI R&D Laboratories  
YRP Center No.3 Bldg., Hikarinooka 7-1, Yokosuka, Kanagawa, 239-0847, Japan  
E-mail: {fuke, izumikawa, sugiyama, nohara}@kddilabs.jp

**Abstract** We propose a relay connection scheme between CDMA2000 1xEV-DO and wireless LAN where user can access to the 1xEV-DO network over wireless LAN and the repeater. This scheme can compensate the penetration loss and improve the user throughput from its direct connection to the networks. We have carried out the link budget analyses, which show the proposed scheme can enlarge the 1xEV-DO coverage area by a wireless LAN relay. Then, we have developed a prototype gateway equipment to interconnect 1xEV-DO with a wireless LAN. The experiment results under a static environment show the proposed connection scheme effectively improves the throughput performance especially in a low RSSI area of 1xEV-DO. The analysis under a high-speed mobile environment also shows the proposed scheme works effectively.

**Keywords** CDMA2000 1xEV-DO, Wireless LAN, gateway, heterogeneous media access

#### 1. はじめに

広域性・移動性に優れたセルラー通信システムは現在広く普及しており、場所に拠らず通信の恩恵を受けることができる。通信速度に関しては、従来は百数十 kbit/s と低速であったが、近年 CDMA2000 1xEV-DO (以下、1xEV-DO と記す)

などの高速通信手段が普及しつつあり、セルラー通信システムに高速性という要素が加わる。ただし、1xEV-DO の場合 C/I (Carrier to Interference Ratio) を基準として伝送速度を決定するベストエフォートシステムである。すなわち、高速通信サービスを楽しむためには、高い C/I が得られるエリアにユーザが位置する必要があり、これが

可能なのは基地局から一定距離以下のエリアに制限される。しかしながら、基地局からの距離が十分短い場合であっても、建物や車両など閉空間内では伝搬損失の増加により RSSI (Received Signal Strength Indicator) 値及び C/I が低くなり、十分な伝送速度を得られない場合がある。

このような不感地帯の解消や通信速度向上を目的に近年研究されているのがマルチホップネットワークである。このマルチホップネットワークは主に 2 つのアプローチがある。1 つは既存セルラーシステムの拡張であり、移動端末に中継機能を持たせて実現しようとする手段である [1][2][3]。もう 1 つは異種メディアを相互接続したアプローチである [4][5][6]。この例として、セルラーシステムと無線 LAN を相互接続し、接続性を確保するシステムがある。それぞれ特徴を有するが、本稿では後者の異種メディアを用いたマルチホップシステムのアプローチについて検討した。

マルチホップシステムの検討要素としてコストが挙げられる。上記で述べた不感地帯対策としてリピータの利用が考えられる。これはセルラーシステムで一般的に取られる手法であるが、設置場所や装置規模を考えるとコスト面から課題がある。

これに対し、異種メディアの相互接続システムとして、近年ノート型 PC に普及している無線 LAN を中継手段として用いれば、市販されている無線 LAN 機器を使用可能であるため、低コストでシステム構築できる。装置規模も小さく、簡易な中継器を窓際等に設置するだけで 1xEV-DO の弱電界地帯を無線 LAN によりカバーすることが可能になる。また、セルラー網と無線 LAN は用いる周波数帯が異なることから、セルラー網のセル設計に与える影響も低いと考えられる。

本稿では、上記で述べた異種メディアを用いるマルチホップシステムについて、基本システム構成を述べ、無線 LAN による 1xEV-DO エリアの拡大効果を検証するため回線設計を行う。次に、開発した中継装置について、機器構成及び実装機能を述べる。最後に、提案手法を静止環境下及び移動環境下で評価した結果を報告する。

## 2. 基本システム構成と回線設計

### 2.1 基本システム構成

基本システム構成を図 1 に示す。図 1 に示すように、本稿で述べるシステムでは WAN 側の 1xEV-DO と LAN 側の無線 LAN が中継装置を介

して接続される。ユーザ (クライアント PC) は中継装置まで無線 LAN を用いて接続し、中継装置がインタフェース変換を行い、1xEV-DO に接続する。

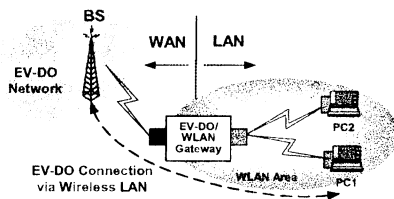


図 1 基本システム構成

### 2.2 1xEV-DO の回線設計

まず、本提案システムを回線設計の観点から検証する。

セルラーシステムでは、基地局のセルエリア内において通信が可能となるように回線設計を行っている。1xEV-DO はセルラーシステムの 1 つであるが、従来システムとは異なりベストエフォート型システムである。このため、基地局のエリア内であっても C/I 値に依存して伝送速度が変化する。ただし、著しい通信速度の低下を招かないよう、所定の目標通信速度 (例えばフォワードリンク 153.6 kbit/s) を満足すべく回線設計が行われている。

本提案システムでは無線 LAN による中継を行うため、1xEV-DO と直接接続の場合には低速度しか得られない端末であっても、中継構成により高速度の通信が期待できる。このため、以下では 1xEV-DO のフォワードリンク伝送速度を 614.4 kbit/s と比較的高い値に設定して回線設計を行った [7][8]。回線設計の結果を表 1 に示す。なお、本回線設計では周辺セルからの干渉は考慮していない。表 1 から、1xEV-DO 側で許容可能な最大伝搬損失は、約 138 dB となる。

表 1 1xEV-DO 回線設計例(フォワードリンク)

	単位	値
伝送速度	kbit/s	614.4
キャリア帯域幅	MHz	1.23
同上	dB-Hz	60.9
基地局送信電力	dBm	37.0
ケーブル損失	dB	1.0
送信アンテナ利得	dBi	17.0
受信アンテナ利得	dBi	0.0
端末受信 NF	dB	8.0
熱雑音電力密度	dBm/Hz	-174.0
受信雑音電力	dBm	-105.1
所要 C/I (614.4 kbit/s)	dB	-0.8

端末受信感度	dBm	-105.9
挿入損失 (建物・車内)	dB	10.0
フェードマージン	dB	5.0
その他損失	dB	6.0
最大伝搬損失 (挿入損失有り)	dB	137.9

## 2.3 無線 LAN の回線設計

無線 LAN についても同様に回線設計を行った (表 2)。無線 LAN は現在一般的な IEEE802.11b 標準を想定した。表 2 より、無線 LAN における許容可能な最大伝搬損失は約 100 dB となる。

表 2 無線 LAN の回線設計例

	単位	値
伝送速度	Mbit/s	11
キャリア帯域幅	MHz	26.0
同上	dB-Hz	74.1
送信電力	dBm	20.0
ケーブル損失	dB	1.0
送信アンテナ利得	dBi	0.0
受信アンテナ利得	dBi	0.0
端末受信 NF	dB	8.0
熱雑音電力密度	dBm/Hz	-174.0
受信雑音電力	dBm	-91.9
所要 C/N	dB	6.0
端末受信感度	dBm	-85.9
挿入損失 (建物・車内)	dB	0.0
その他損失	dB	5.0
最大伝搬損失	dB	99.9

## 2.4 セルサイズ

次に、代表的な伝搬モデルを元に伝搬損失の推定を行う。まず、セルラーシステムでは、建物・回折・反射などの影響を考慮する必要があることから、伝搬モデルとして Walfisch-Ikegami モデル (基地局高が平均建物高より高い場合) を用いた [9]。また、2.4GHz 帯無線 LAN では 3.3 乗則の自由空間モデルを想定し、伝搬損失を計算した [10]。これらの結果を図 2 に示す。

表 1、表 2 及び図 2 より、1xEV-DO のセルサイズは、フォワードリンク伝送速度 614.4 kbit/s の場合、800MHz、2GHz でそれぞれ 1.2km、700m となる。

一方、無線 LAN の許容伝搬損失は 100dB であり、伝搬距離に直すと約 150m (無指向性アンテナの場合) となる。セルサイズに比べると、150m は大きくないが、建物・車内内部等の不感地帯での通信を可能にするには有効であると考えられる。このように、本提案システムの無線 LAN 中継はセルラーのリピータと比較すると低コストで実現でき、且つ上記のセルサイズを拡大することが可能と考えられる。

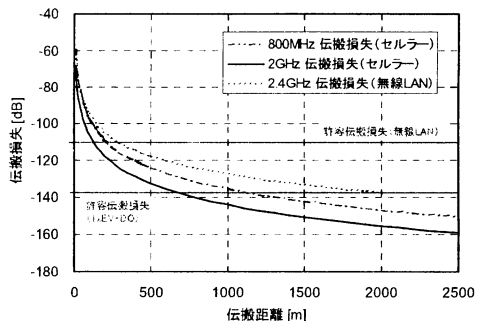


図 2 伝搬損失

## 3. 開発装置と実装機能

### 3.1 開発装置の概要

上記の効果を検証するため、中継装置試作を行った。本試作装置は、WAN 側に 1xEV-DO インタフェース、LAN 側に無線 LAN インタフェースを持ち、これらを相互変換する。中継装置のハードウェアは市販の小型 Linux 装置 (図 3) を使用し、中継に必要な機能をソフトウェアで実現した。なお、1xEV-DO 及び無線 LAN 共に市販の PCMCIA 型のインタフェースカードを用いた。無線 LAN カードは IEEE802.11b 準拠であり、アンテナは中継装置側及び PC 側共にカード内蔵タイプである。また、中継装置を無線 LAN アクセスポイントとして動作させることにより、複数 PC が同時に接続可能となる。

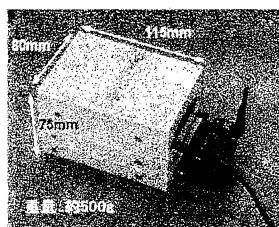


図 3 開発装置外観 (上側カード: 1xEV-DO、下側カード: 無線 LAN)

本装置には 2 つの中継機能を実装した。1 つは複数ユーザが 1xEV-DO にアクセス可能にするルータ機能、もう 1 つはユーザは 1 に限定されるが、通信中の PPP セッションや TCP セッションを継続可能なリピータ機能である。以下、各機能の概要を述べる。

### 3.2 ルータ中継機能

ルータ機能は中継装置を IP ルータとして動作させることにより中継機能を提供するものである。中継装置には DHCP サーバ機能、NAPT (Network Address Port Translation) 機能、Web サーバ機能が実装されている。ルータ機能による通信シーケンスを図 4 に示す。

図 4 において、PC と中継装置の間に無線 LAN リンク確立後、中継装置 (DHCP サーバ) は PC に対してプライベート IP アドレスを割り当てる。次に、ユーザは Web ブラウザから中継装置の規定ログイン画面 (ポータルページ) に接続し、ログイン ID とパスワードを入力する。これら入力情報は中継装置で認証が行われ、正規ユーザであれば中継装置は 1xEV-DO への発呼を行う。中継装置と 1xEV-DO (PDSN) 間に PPP セッションが確立すると中継装置は NAPT による中継を開始し、PC は中継装置を介した PDSN (Packet Data Serving Node) への通信が可能となる。

上記で述べたように、ルータ機能では NAPT を用いるため複数 PC の接続が可能である。既に 1xEV-DO と接続している PC が存在すれば、2 台目以降の PC は中継装置での認証成功後、直ちに通信可能となる。この場合、複数台の PC で 1 本の PPP セッションを共有する形態となる。

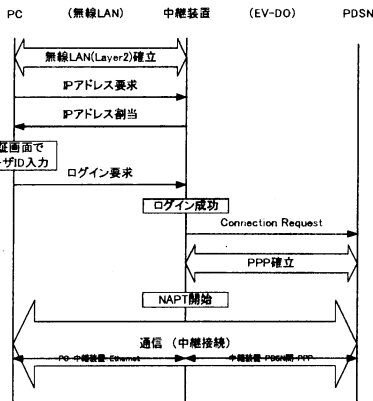


図 4 中継装置のルータ機能による通信シーケンス

### 3.3 リピータ中継機能

ルータ機能では、無線 LAN 中継によりユーザ PC から 1xEV-DO へのアクセスが可能となるが、ユーザ PC を 1xEV-DO との直接接続から中継接続に切り替える場合にセッションの継続性がなくなる。これを改善するのがリピータ機能である。このリピータ機能を用いると、図 5 に示す手順により PPP/TCP セッションの継続が可能となる。

なお、詳細は別文献[11]で述べる。

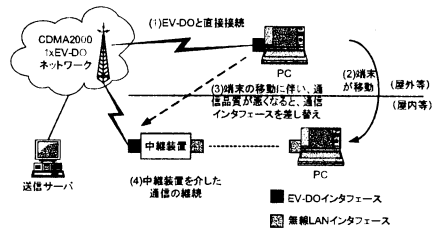


図 5 リピータ機能概要

## 4. 静止環境下での特性評価

開発装置を用い、提案手法の有効性を確認するため、静止環境下で特性取得を行った。

### 4.1 実験構成

静止環境下の特性評価では、図 6 に示すように PC1 台をユーザ端末として用い、1xEV-DO への直接接続及び中継接続に関して下記項目の測定を行った。

- (1) PC から 1xEV-DO へ直接接続 (中継装置無し)
  - ・ 1xEV-DO の RSSI、C/I
  - ・ FTP スループット
- (2) PC から中継装置経由で 1xEV-DO へ接続
  - ・ FTP スループット

まず、電波環境の良い窓際 (地点 A) に PC を設置し、1xEV-DO の RSSI と C/I、及び直接接続時の FTP スループットを計測した。引き続き同一場所に中継装置を設置し、中継接続に切り替えて FTP スループットを測定した。次に、中継装置の場所を地点 A に固定した状態で、PC の位置を建物内部 (地点 B、地点 C) に移動し、直接及び中継各接続にて上記項目の測定を行った。なお、地点 A から地点 B、C への直線距離はそれぞれ 12m、20m、3 地点はいずれも異なる室内の見通し外環境である。また、RSSI 及び C/I は、伝送特性測定用の専用端末を用いてそれぞれの値を取得した。

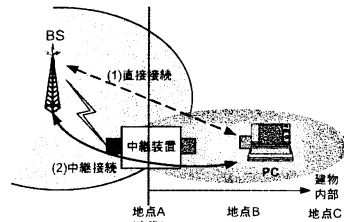


図 6 静止環境下の実験構成

## 4.2 スループット特性

静止環境下におけるスループット特性測定結果を図 7 に示す。いずれの値も、10 回ずつ測定した平均値を示す。また、無線 LAN 区間の通信品質は良好であった。

直接接続では、PC が建物内部に移動する（地点 A→地点 C）に連れ、RSSI 及び C/I が低下し、最終的にスループットの劣化につながっている。一方、中継接続では PC の位置に拠らず一定の値が得られている。低 RSSI 領域での改善は顕著であり、本手法が有効に機能することが分かる。本試験は建物を利用して実施したが、車両内部など低 RSSI 領域が存在する場所においても同様の効果が期待できる。

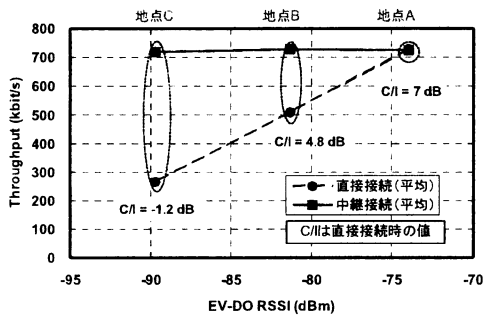


図 7 直接・中継接続時のスループット特性（静止環境下）

図 7 では地点 C でも低速ながら 1xEV-DO へ直接接続できている。このため、建物内で挿入損失の大きい別の個所で伝送特性を測定した。具体的には、無線 LAN 区間の距離を増加させ、中継接続時のスループット評価を行った。その結果を図 8 に示す。横軸は、地点 A' の無線 LAN RSSI を基準とする場合の、無線 LAN 区間の伝搬損失増分である。縦軸は、得られたスループット値を、地点 A' において得られる中継接続のスループットで正規化した値である。また、破線は 1xEV-DO と直接接続したときのスループット変化であり、プロットしていない地点 C' 及び地点 D' では測定不可であった。なお、地点 A' から地点 B', C', D' への直線距離はそれぞれ 4m, 7m, 10m であり、B', C', D' は同一室内にあるが、地点 A' とはいずれも見通し外環境である。

建物の構造により、無線 LAN の伝搬損失増 30dB（見通し環境下で最大 80m 相当）でスループットは 30% に低下するが、地点 D' は 1xEV-DO への直接接続が不可能なエリアであり、屋内の不

感地帯からの通信が可能となっていることが分かる。

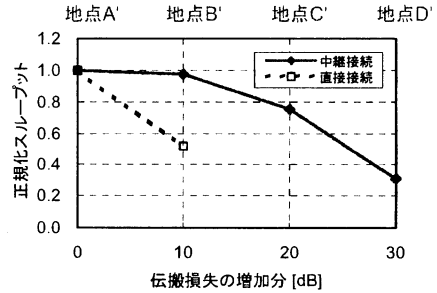


図 8 無線 LAN 区間の特性劣化

## 5. 移動環境下での特性評価

次に、移動環境下における特性評価を実施した。

### 5.1 実験構成

移動環境下の特性評価では、図 9 に示すように中継装置と PC を移動体（最高速度：約 100km/h）に載せ、中継装置は窓際の電波状態の良い場所に固定した。PC は実験項目に応じて場所を変化させた。

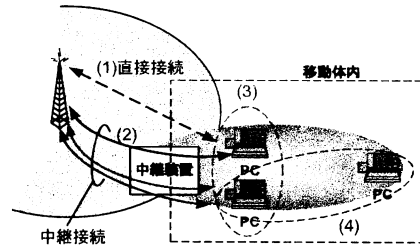


図 9 移動環境下の実験構成

このような実験構成において、以下の構成で FTP スループットの測定を行った。

- (1) 1xEV-DO と直接接続（中継装置無し）
- (2) PC1 台が中継装置経由で 1xEV-DO へ接続（PC-中継装置間は数メートル）
- (3) PC2 台が中継装置経由で 1xEV-DO へ接続（2 台の PC-中継装置間は数メートル）
- (4) PC2 台が中継装置経由で 1xEV-DO へ接続（2 台の PC と中継装置間は、1 台が数メートル、もう 1 台が数十メートル）

各項目の測定では同一区間を走行し、走行中 FTP によるファイル取得を繰り返した。その平均値を図 10 に示す。

(1)と(2)の違いによる特性差、すなわち中継装置での処理遅延はほとんど見られない。(3)では1xEV-DOの帯域を2台のPCで共有する形となるが、(2)と(3)を比較すると総スループットは35%向上している。これは、ACKを待つというTCPの特性上、無線区間には空き時間があり、この間別のTCPセッションのデータを送受信できることで、多重効果による1xEV-DO帯域の利用効率改善が図られるためである。ただし、(4)の結果から分かるように、中継装置から遠いPCが存在する場合は総スループットが低下しており、無線LAN区間の特性改善が課題である。

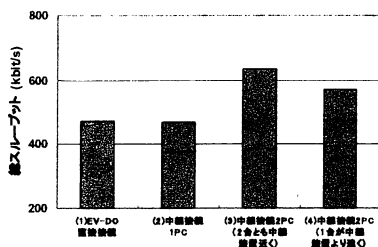


図 10 移動環境下でのスループット特性

## 6. 実験結果への考察

特性評価の結果から、本提案の中継方式は静止環境および移動環境で有効であるが、移動環境で用いる場合、TCP/IP に対するスループットが低く抑えられる課題も確認された。

1xEV-DO などのセルラーシステムはドーマント機能を実装しており、一時的な無線リンクロスを上位プロトコル (PPP) に対しては隠蔽する仕組みがある。しかし、更に上位プロトコルである TCP/IP は元々有線回線を前提に設計されたプロトコルでもあり、無線回線特有のパケットロスや品質変動との整合性が悪い[12]。この対策として別文献[11]で Freeze TCP の改良を提案しているが、無線の瞬時変動に対しては効果が低いなどの課題が残る。よって、これら TCP/IP プロトコルの改善手法と合わせて、セルラー回線側の複数化などインフラ側の対策も必要と考えられる。

## 7. まとめ

本稿では、1xEV-DO の不感地帯の解消やスループット向上を無線 LAN 中継により図る手法を提案し、まず回線設計でその有効性を実証した。次に、中継装置の試作を行い、静止環境・高速移動環境における特性評価を行った。静止環境での

測定結果により、提案中継手法の有効性、特に 1xEV-DO の低 RSSI 領域でのスループット向上に著しい効果があることを確認した。更に移動環境下での評価でも中継手法が有効に働くことを確認し、また多重効果による 1xEV-DO 帯域の有効利用が可能であることを実証した。なお、本試験は測定の一例であり、今後更に多様な伝搬環境での測定検証が必要である。最後に日頃ご指導頂く KDDI 研究所浅見所長、篠永執行役員、並びに本研究にご議論頂いた KDDI au 技術本部各位に感謝する。

## 文 献

- [1] O. Maeshima, N. Fuke, K. Sugiyama, H. Shinonaga and A. Acampora, "Simulation evaluation on area extension and system capacity of CDMA packet communication system utilizing multihop connection," IEEE PIMRC, Vol.2, pp. 1496-1500, Sep. 2003.
- [2] Y. Yamao, T. Otsu, A. Fujiwara, H. Murata and S. Yoshida, "Multi-hop radio access cellular concept for fourth-generation mobile communications system," IEEE PIMRC, Vol. pp.15-18, Sep. 2002.
- [3] Ying-Dar Lin and Yu-Ching Hsu, "Multihop cellular: a new architecture for wireless communications," IEEE INFOCOM, Vol.3, pp.1273-1282, Mar. 2000.
- [4] Kumar K.J., Manoj B.S., Murthy C.S.R., "On the use of multiple hops in next generation cellular architectures," IEEE ICON, pp.283-288, Aug. 2002.
- [5] Hui Li, Dan Yu, Hui Chen, "New approach to multihop - cellular based multihop network," IEEE PIMRC, Vol.2, pp.1629-1633, Sep. 2003.
- [6] H. Y. Wei and R. D. Gitlin "Two-Hop-Relay Architecture for Next-Generation WWAN/WLAN Integration," IEEE Wireless Communications, p.24-30, April 2004.
- [7] E. Esteves, M. I. Gurelli and M. Fan, "Performance of fixed wireless access with cdma2000 1xEV-DO," Proceedings of VTC 2003-Fall, September 2003.
- [8] P. J. Black and Q. Wu, "Link budget of cdma2000 1xEV-DO wireless Internet access system," Proceedings of PIMRC 2002, September 2002.
- [9] ITU-R Recommendation P.1411-2, "Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz."
- [10] IEEE 802.11-01/286.
- [11] 泉川他, "1xEV-DO/無線 LAN 中継装置を用いた TCP・PPP セッション保持手法および評価," 本研究会予稿.
- [12] 松田, 山本, "無線ネットワークにおける TCP の研究動向と今後の課題", 信学誌, Vol. 87, No.7, 2004.