

高速道路上における 2.4 GHz 帯 SS 無線 LAN を用いた通信実験

蕨野貴之 福家直樹 石川博康 篠永英之 本岡孝嗣[†]
内山晴之[†] 照屋 茂[†] 竹田 剛^{††} 森本稔生^{††} 米山 稔^{†††}

KDDI 研究所 [†]KDDI ^{††}日本道路公団 ^{†††}ドーシス

本稿では、2.4 GHz 帯 ISM (産業科学医療) バンドを用いる SS 無線 LAN をアクセスポイントとして道路上に連続的に配置し、SS 無線 LAN 装置を搭載した移動車両に対して IP ベースの通信サービスを提供する道路無線システムを想定して実施した通信実験について報告する。具体的には、車両 - アクセスポイント間の通信実験、複数アクセスポイント間にわたる中継伝送実験について、実験構成やシステム諸元を説明するとともに、高速道路上で実施した実験結果を報告する。また、室内実験により、中継伝送を伴う場合の通信性能について定量的に評価する。

Results of field tests using 2.4GHz SS wireless LAN on highway

Takayuki Warabino, Naoki Fuke, Hiroyasu Ishikawa, Hideyuki Shinonaga, Takashi Motooka[†], Haruyuki Uchiyama[†], Shigeru Teruya[†], Takeshi Takeda^{††}, Toshio Morimoto^{††}, Minoru Yoneyama^{†††}

KDDI R&D Laboratories, [†]KDDI, ^{††} Japan Highway Public Corporation and ^{†††}Dosys.

Road-to-vehicle wireless system using 2.4GHz SS devices was proposed in [1]. The proposed system presents the IP-based services such as real-time remote monitoring, Voice-over-IP and data distribution. In this paper, concerning about transmission experiments (a) between mobile station and access point, and (b) between access points, the results of field tests held on the Chuou highway in December 2000 are shown. A quantitative analysis of transmission capability in case (b) is also discussed.

1. はじめに

2.4GHz 帯は ISM(Industrial, Scientific and Medical)バンドとしてレーザメスや電子レンジ等の産業科学医療機器に利用されている。本バンドは、免許不要・回線使用料不要であるため、屋内での無線 LAN としての利用のみならず、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。ただし、2.4GHz 帯を使用する無線

装置は、他の ISM 機器からの干渉の影響を受ける可能性がある。従って、干渉の影響を回避するために、信号の周波数帯域を拡散伝送するスペクトラム拡散 (SS: Spread Spectrum) 技術の適用が義務付けられている。

ここで、高速道路上における道路管理用の自営無線として、アクセスポイント用の SS 無線 LAN を道路上に連続的に配置し、SS 無線 LAN を搭載した移動車両に対して IP ベースの通信サービスを提供

する道路無線システムが提案されている[1]。図1にシステム構成を示す。提案システムは主に、(a) 移動車両とアクセスポイント間の無線伝送区間、(b) インターチェンジ等に配置された収容局と各アクセスポイント間を接続する隣接アクセスポイント間の無線中継伝送区間、および(c) 収容局と交通管制室を接続する有線ネットワーク区間の3つの通信形態に分けることができる。

提案システムの最大のメリットは回線使用料が不要で、安価なSS無線装置を用いることで、システム構築に要するコストを安く抑えられることにある。ただし、実際のシステム構築にあたっては、アンテナ高に対する通信距離、複数のアクセスポイントを中継伝送する際の packets 転送遅延・スループット特性、他システムからの干渉の影響について検証する必要がある。

従って、上記の検証を行うため、平成12年12月に中央自動車道において、車両 - アクセスポイント間伝送および隣接アクセスポイント間の中継伝送のフィールド実験を実施した。また、室内実験により中継回数を増やしたケースについて特性評価を行った。本稿では、実験構成やシステム諸元を説明するとともに、取得した実験結果について報告する。

2. 車両 - アクセスポイント間の通信実験

2.1 実験概要

車両 - アクセスポイント(AP)間の通信実験では、市販の2.4GHz帯SS無線装置(表1)を用い、路側帯に設置したAPと車両に搭載した無線装置間のパケット誤り率を測定した。

図2に、車両 - AP間通信実験の構成を示す。図に示すように、APを中央道府中バス停上り線の路側帯に配置し、バケット車を利用して、地上高4mおよび10mに無指向性アンテナを設置した¹。一方、

¹ 4m: 車両 - AP間の見通しを一般走行車両の車高に遮られない最小の高さ
10m: 実際の運用において、照明ポール等に設置可能と思われる最大の高さ

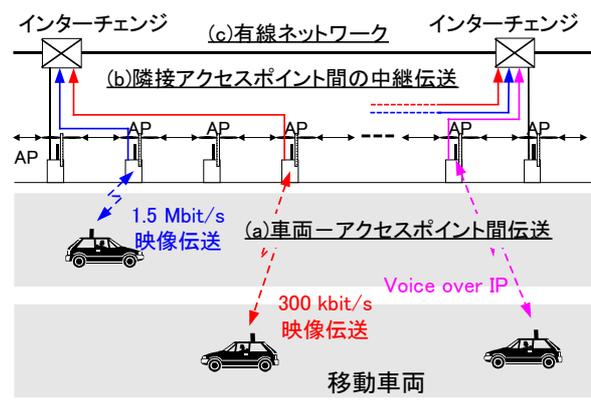


図1. 道路無線システムの構成

表1. 使用SS無線装置の基本仕様

	無線機 A	無線機 B
送信周波数	2,483.8 MHz	2,479/ 2,489 MHz
変調方式	直接拡散方式スペクトラム拡散	
送受信アンテナ	無指向性アンテナ (AP) /2 ホイップアンテナ (車両)	
送信電力	10mW/MHz 以下	
PN 符号	M 系列 127 チップ	M 系列 31 チップ
チップレート	14.111MHz	8MHz
伝送速度	111kbit/s	420kbit/s
データ変調速度	32kbit/s	256kbit/s
インターフェース	RS232C	RS232C,RS422
ボーレート	1200-19200bps	4800-38400bps

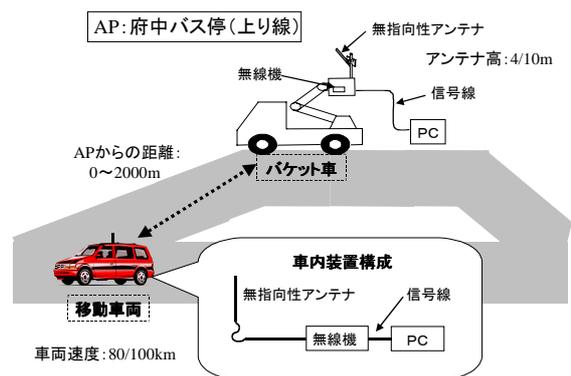
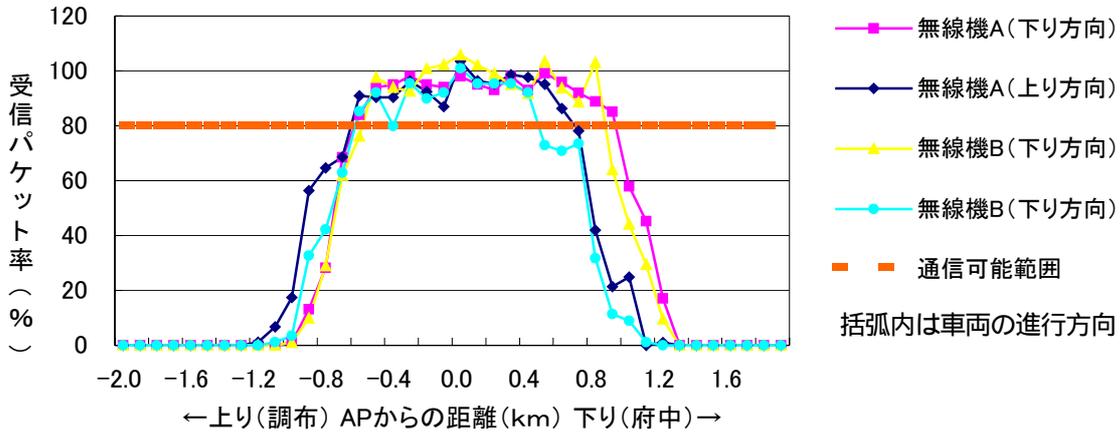


図2. 車両 - AP間通信実験の構成

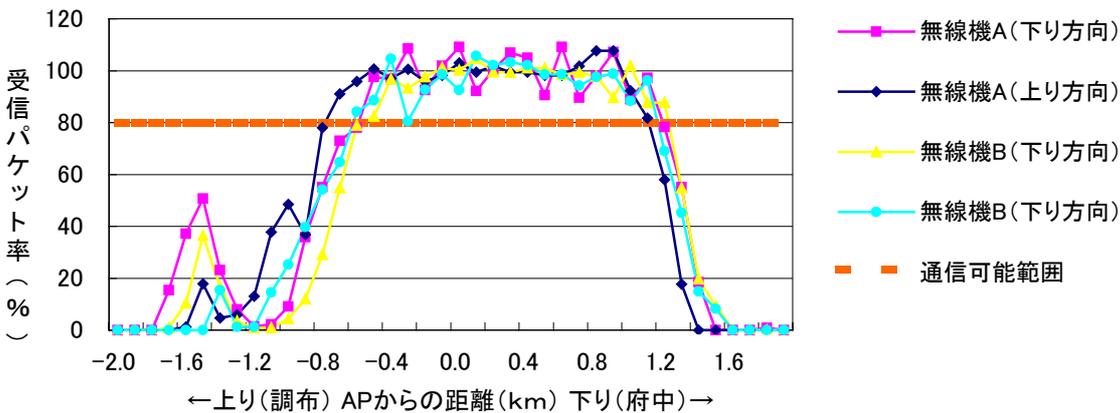
移動車両にも同じSS無線装置を搭載し、無指向性のホイップアンテナを移動車両のルーフ上部に設置した。

実験では、SS 信号の拡散率の違いによる耐干渉性の評価を行うため、拡散率が異なる 2 種類の無線機を使用し（無線機 A：127 倍、無線機 B：31 倍）車両と AP の通信距離に応じたパケット誤り率特性を測定した。具体的には、AP から一定間隔（150msec）

でパケット（32Bytes）を送信しながら、車両側で受信パケットを記録し、送信パケット数に対する受信パケット数の比率により受信確率を算出した。また、測定は、AP を中心に上り・下りの両方向について 2km の範囲で、2～3 回実施した。



(a) アンテナ高 4m の場合



(b) アンテナ高 10m の場合

図 3 . パケット誤り率特性

表 2 . 受信パケット率が 80%以上となる通信区間

(a) 無線機 A

走行方向	下り		上り	
アンテナ高	4m	10m	4m	10m
通信可能区間	-0.6km	-0.5km	-0.6km	-0.7km
	0.9km	1.1km	0.6km	1.1km

(b) 無線機 B

走行方向	下り		上り	
アンテナ高	4m	10m	4m	10m
通信可能区間	-0.5km	-0.5km	-0.6km	-0.6km
	0.8km	1.2km	0.4km	1.1km

2.2 通信実験の結果

図3に、アンテナ高4mおよび10mの2ケースについて、車両がそれぞれの進行方向(上り・下り)に時速80km/hで走行する際の受信パケット率を示す。また、通信可能距離の目安として、受信パケット率が80%以上となる区間を表2に示す。

実験結果より、無線装置の違いによる顕著な差は見られないが、若干拡散率の高い無線機Aの方が通信可能領域を越えた区間における受信パケット数が高い傾向が見られた。

アンテナ高の影響については、4mの場合に-0.6km(調布方向)~0.9km(府中方向)であった通信可能領域が、10mの場合には-0.7km~1.1kmまで広がることを確認した(無線機A)。これはアンテナ高を高くすることで見通し距離が伸びるためである。また、調布方向と府中方向の通信距離の違いについては、調布方向の道路形状が若干カーブしていることに対し、府中方向は直線であったことが影響したものと考えられる。更に、アンテナ高が10mの場合には、調布方向1.5kmの地点においてパケット受信確率は低いながらも受信できる区間が存在することが確認された。

なお、時速100kmでの走行についても同様の実験を行ったが、速度差による違いはほとんど見受けられなかった。

2.3 考察

ここでは、車両-AP間の通信実験結果をもとに、今回使用したSS無線装置を用いてシステムを構築する際のシステムパラメータについて考察する。

アンテナ高については、4mの場合でも問題なく通信を行えること、アンテナ高を高くすることでエリアが広がることを確認した。また、府中方向では約1km程度の通信が可能であったが、調布方向では通信可能領域が500m程度と短く、通信距離は見通し距離で制限されることが確認された。

従って、車両-AP間通信システムの構築例として、アンテナ高を4m以上とし、通信距離は道路形状に応じて見通し範囲とする構成が想定される。ただし、道路形状が直線である場合には、通信距離は

最大で1km程度までとなる。

また、アンテナ高が10mの実験において、調布方向1.5kmの地点でパケット受信確率は低いながらも受信できる区間が存在している。従って、APを連続的に配置した場合には、隣接するAPへの干渉も想定されるため、周囲環境に応じたアンテナ高を設定する必要がある。

3. アクセスポイント間の通信実験

3.1 実験概要

AP間の通信実験では、KDDI研究所で開発した2.4GHz帯CFO-SS無線システム[2,3]を用い、路側帯への設置が想定される複数のAP間にわたる中継伝送試験を行った。

表3にCFO-SS無線システムの基本仕様を示す。今回の実験では、10Mbit/sの伝送速度をもつ

表3. 使用無線装置(CFO-SS10A)の基本仕様

変調方式	CFO-SS方式
使用周波数帯	2,400~2,483.5MHz 2,471~2,497MHz
チャネル帯域幅	26MHz
チャネル数	4チャンネル (同時使用は3チャンネルまで)
伝送速度	10Mbit/s
インターフェース	10/100Base-T
空中線電力	0.25mW/MHz
アンテナ利得	19dBi, 24dBi
アクセス制御	CSMA/CA

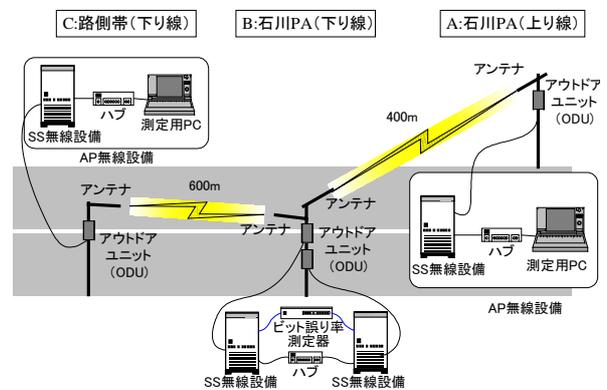


図4. AP間通信実験の構成

CFO-SS10A を使用し、アンテナには 19dBi の八木アンテナを用いた。

図 4 に、AP 間中継伝送実験のシステム構成を示す。図に示すように、実験では 3 基の AP を石川パーキングエリア上り線(A 地点) 下り線(B 地点: A 地点から約 400m) および路側帯(C 地点: B 地点から約 600m) に固定設置した。実験では、通信距離の長い B - C 区間に対して受信レベル特性及びビット誤り率特性を測定するとともに、各無線リンクおよび A - C の中継伝送区間に対し転送遅延時間及びスループット特性を評価した。

また、道路無線システムにおける動画像伝送アプリケーションの動作確認を目的として、遠隔監視カメラを用いた画像伝送実験を実施した。

3.2 通信実験の結果

(1) 受信レベル特性

一方の無線装置から最大送信出力(10 mW/MHz)で連続波を送信し、受信側でアッテネータを挿入することにより、受信機入力レベルが最適値(-70dBm)となるように設定した。また、そのときのアッテネータ値を回線マージン量として記録した。なお、実験は通信距離の長い B - C 区間で行った。

表 4 に受信レベルの実験結果を示す。実験の結果、アンテナ高が 4 m、10 m の何れにおいても無線 LAN の所望 BER=10⁻⁵ を満足する受信機入力レベル(-80 dBm)を大きく上回り、ほぼエラーフリーとなる感度(-70 dBm)に対する回線マージンが 14 ~ 18dB 程度となることを確認した。なお、伝搬ロスとして自由空間損を想定した場合、これらのマージンは通信距離約 3 km ~ 5 km に相当することになる。

(2) ビット誤り率特性

通信距離の長い B - C 区間を実験対象とし、10 Mbit/s のシリアルデータ(PN9)により 10 分間の連続 BER 測定を行った。具体的には、連続データを C 地点から送信し、B 地点でビット誤り率測定器により特性取得を行った。

表 5 にビット誤り率の実験結果を示す。実験結果

表 4. 受信レベル特性 (B - C 区間)

	アンテナ高 4m	アンテナ高 10m
周波数チャンネル[MHz]	2414	2414
RSSI 値 [V]	3.62	3.62
受信レベル [dBm]	-70	-70
回線マージン [dB]	14	18

表 5. ビット誤り率特性 (B - C 区間)

	アンテナ高 4m	アンテナ高 10m
周波数チャンネル[MHz]	2414	2414
伝送ビット数[Mbits]	6.00 × 10 ⁹	6.00 × 10 ⁹
エラー発生回数 [bits]	661	41
ビット誤り率	1.10 × 10 ⁻⁷	6.83 × 10 ⁻⁹

より、アンテナ高が 10 m の場合で約 7 × 10⁻⁹、4 m で約 1 × 10⁻⁷ であり、アンテナ高が 4m の場合に品質が若干劣化する傾向にあることが確認された。これは、アンテナ高が低い場合に路面や走行車両からの反射波の影響を受けやすくなるためと考えられる。ただし、無線区間では誤り再送を行っているため、誤り率が 10⁻⁶ 以下であれば動画伝送やファイル転送等のアプリケーションへの影響は小さく、アンテナ高は 4 m、10 m 何れの場合でも特に問題ないものと考えられる。

(3) 転送遅延特性

パケット長 64 Bytes、1000 Bytes の 2 種類のパケット長につき、各 AP に配置した特性評価用 PC 間で ping 転送を行った。これにより、往復の転送に要する遅延時間の最小値、最大値、平均値を測定した。表 6 にアンテナ高 4m/10m、パケット長 64 /1000 Bytes のそれぞれの場合について実験結果を示す。

取得した転送遅延には、無線伝送に伴う伝送遅延や無線機器の処理遅延の他に、有線区間(Ethernet)での伝送遅延や、PC の処理遅延等が含まれる。そのため、パケット長が大きくなるほど伝送遅延や無線機器および PC での処理遅延が増加し、全体の転送遅延は長くなる傾向にある。また、中継により 2 リンクのパケット往復転送を行った場合には、1 リンク

表 6 . 往復での転送遅延特性

(a) アンテナ高 4m/64Bytes の場合

実験区間	A - B	B - C	A - C (中継)
送信パケット数	150	150	150
有効パケット数	149	150	149
最小遅延量[msec]	1.1	1.2	2.4
平均遅延量[msec]	1.5	1.3	3.3
最大遅延量[msec]	4.8	2.5	9.7

(b) アンテナ高 4m/1000Bytes の場合

実験区間	A - B	B - C	A - C (中継)
送信パケット数	150	150	150
有効パケット数	150	150	150
最小遅延量[msec]	5.0	5.6	11.1
平均遅延量[msec]	5.3	6.1	11.7
最大遅延量[msec]	8.1	11.2	17.2

(c) アンテナ高 10m/64Bytes の場合

実験区間	A - B	B - C	A - C (中継)
送信パケット数	150	150	150
有効パケット数	149	149	149
最小遅延量[msec]	1.2	1.2	2.4
平均遅延量[msec]	1.3	1.7	3.0
最大遅延量[msec]	3.6	6.0	9.3

(d) アンテナ高 10m/1000Bytes の場合

実験区間	A - B	B - C	A - C (中継)
送信パケット数	150	150	150
有効パケット数	150	150	147
最小遅延量[msec]	5.0	5.6	11.1
平均遅延量[msec]	5.3	5.8	12.7
最大遅延量[msec]	8.0	10.0	24.5

リンクのパケット往復転送の場合に比べ転送遅延量が
大凡 2 倍(平均で 2.2 倍)となった。しかしながら、
パケット長が比較的長い 1000 Bytes の場合でも 1
回の中継により生じる転送遅延は片方向で約
2.5msec 程度と非常に短い時間であった。

影響により、無線装置のキャリアセンス機能が作動
したものと予想される。なお、干渉波の発生頻度は
一定でなく、時間帯によって発生量は異なる傾向に
あった。

(4) スループット特性

各無線リンクおよび中継伝送において、FTP を用
いてファイル転送を行い、転送時間およびスループ
ットを測定した。実験では 2MBytes のファイル転
送を 5 回を行い、転送時間とスループットの平均値を
それぞれ算出した。

表 7 にスループットの実験結果を示す。実験の結
果、各無線リンクにおいて約 4.0Mbit/s 以上のスル
ープットが得られ、室内レベルとほぼ同等であるこ
とが確認できた。また、B - C 区間のみ、アンテナ
高 10 m のスループット特性が若干高く得られたが、
アンテナ高による差はほとんど見られなかった。更
に、1 回中継することにより、スループット量が
10%程度低下することが確認された。

また、アンテナ高 10m での C A 区間での中継
伝送時のスループットが約 3.15 Mbit/s と若干低い
値であったが、これは C 地点で確認された干渉波の

表 7 . スループット特性

(a) アンテナ高 4m の場合

	転送時間 [sec]	平均スループ ット[Mbit/s]
A B	3.99	4.01
B A	3.93	4.08
B C	4.16	3.85
C B	3.91	4.10
A C (中継伝送)	4.50	3.56
C A (中継伝送)	4.29	3.73

(b) アンテナ高 10m の場合

	転送時間 [sec]	平均スループ ット[Mbit/s]
A B	3.98	4.02
B A	4.17	3.87
B C	3.53	4.53
C B	3.58	4.47
A C (中継伝送)	4.13	3.88
C A (中継伝送)	5.15	3.15

(5) 画像伝送実験

A 地点に設置した遠隔監視システム制御用 PC より、A 地点（有線接続）B 地点（無線リンク 1 ホップ）C 地点（無線リンク 2 ホップ）に接続された遠隔監視カメラからリアルタイム映像を取り込み、品質確認を行った。表 8 に使用した遠隔監視システムの基本仕様を示す。なお、各カメラに接続されたコーデックのパラメータは全て同一とし、アンテナ高は 10m の 1 種類のみ評価の対象とした。

実験の結果、中継伝送時にも問題なくリアルタイム映像が得られることを確認した。また、無線区間を介すことによる画像の品質劣化はほとんど見られず、中継伝送の場合も同様の結果が得られることが確認できた。なお、3 台のカメラからの映像を同時に制御用 PC に取り込んだ場合については、伝送画像を高画質にすると画像再生用ソフトウェアや PC の処理能力の制限とみられる画像の飛びが観察された。

今回の実験は市販の遠隔監視システムが SS 無線装置を介した中継伝送時にも利用できることを確認することが主たる目的であり、画像の品質については使用した遠隔監視システムの能力にも依存すると考えられる。

3.3 室内での中継伝送実験

フィールド実験では、2 対向の SS 無線装置による中継伝送実験のみ実施したが、より定量的に中継回数に応じた特性の低下量を把握するため、室内実験により中継回数を増やしたケースについて特性評価を行った。

(1) 中継回数に応じたパケット転送遅延特性

中継回数を 2 回まで増やし、パケット長 64 Bytes、1000 Bytes について、往復の転送に要する遅延時間の平均値を測定した（表 9）。表 9 より、中継回数が増えることに伴い、転送遅延時間は線形に増加していることが確認できる。

ここで、中継回数が 3 回以上の場合についても同様に線形増加すると仮定し、中継伝送の回数に応じた片方向の転送遅延特性を表 6 の結果をもとに算出

表 8．遠隔監視システムの基本仕様

項目	仕様	
画像入力	方式	NTSC
	解像度	640x240/320x240/ 160x120
画像圧縮	方式	Motion JPEG ベース
	圧縮率	1/10 ~ 1/200
	処理速度	30 frame/s
	画像圧縮サイズ	64Kbyte/frame 以下
通信	プロトコル	HTTP/FTP/telnet
	接続形態	10Base-T
形状	重量	470g
	サイズ	D137xW180xH30mm

表 9．中継 2 回までの転送遅延特性（往復）

中継回数	中継なし	1 回	2 回
64 Bytes	1.3 [msec]	2.6 [msec]	3.7 [msec]
1000 Bytes	6.3 [msec]	10.8 [msec]	15.2 [msec]

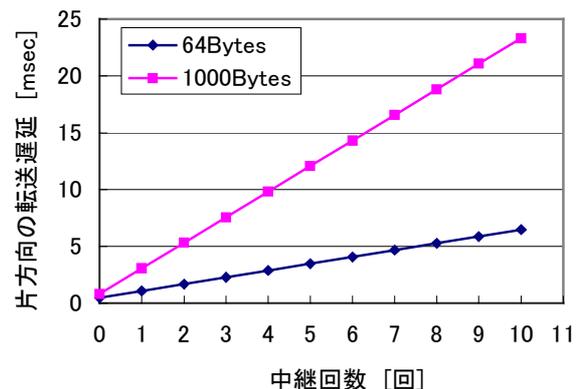


図 5．中継回数に応じた転送遅延特性（片方向）

し、図 5 のグラフに示した。ただし、PC 端末上の処理時間（64Bytes で 0.17msec、1000Bytes で 2.3msec）については数値から除いている。

図 5 より、中継回数が 10 回の場合には、パケット長 64Bytes の時で 6.5 msec、1000 Bytes の時で

² インターチェンジ(IC)間の距離を 20km、AP 間の設置距離を 1km と想定すると、IC 間に必要な AP 数は 21 局となるが、各 AP は双方向にパケットを転送可能なため、実質的な中継回数は 10 回程度となる。

23.3 msec となることが予想される。しかしながら、いずれの場合でも片方向の転送遅延は、リアルタイム性が要求される Voice over IP の許容遅延時間量 200 msec を大きく下回っており、遠隔監視システムのようなリアルタイム性が要求される画像伝送アプリケーションを使用した場合でも、影響を与えない程度の遅延時間と考えられる。

(2) 中継回数に応じた映像通信特性

遠隔監視カメラからリアルタイム映像を送信するアプリケーションにおいて、送信レートを最大値である 1.44 Mbit/s とその半分程度の 0.85 Mbit/s に設定した際の受信レートを測定した(表 10)。なお、測定時間は 180 sec とした。

表 10 より、中継回数を 2 回とした場合でも受信レートに劣化はほとんど見られなかった。これは、使用した SS 無線装置の TCP 上での伝送能力がアプリケーションの必要とするスループットを上回るためであると考えられる。

表 10 . 中継 2 回までの映像通信特性

中継回数	中継なし	1 回	2 回
平均受信レート [Mbit/s] (送信レート 0.85[Mbit/s])	0.83	0.87	0.89
平均受信レート [Mbit/s] (送信レート 1.44[Mbit/s])	1.45	1.40	1.39

4 . まとめ

本稿では、SS 無線 LAN をアクセスポイント(AP)として道路上に連続的に配置し、SS 無線 LAN 装置を搭載した移動車両に対して IP ベースの通信サービスを提供する道路無線システムを想定し、中央自動車道において実施したフィールド実験および室内での中継伝送実験について報告した。

実験の結果、車両 - AP 間において、今回使用した無線装置でのシステム構築例として、アンテナ高を 4m 以上とし、通信距離は道路形状に応じて見通し範囲とする構成が想定され、道路形状が直線である場合には最大で 1km 程度となることが明らかと

なった。また、隣接 AP 間にわたる中継伝送実験では、600m の通信距離において通信に必要な受信レベル・ビット誤り率特性が得られ、室内レベルと同等のスループットとなることが確認できた。更に、室内実験をとおして、中継回数が 10 回の場合でも片方向の転送遅延は 23.3 msec 程度(パケット長 1000 Bytes)と予想され、Voice over IP の許容遅延時間量 200 msec を大きく下回ることが確認できた。

以上より、周囲環境や道路環境によってアンテナの設置位置や高さを事前に確認する必要があるが、SS 無線装置を用いた道路無線システムの実用性を確認することができた。

参考文献

- [1] 石川他, "2.4 GHz 帯 SS 無線 LAN を用いた道路無線システムの提案", 第 5 回高度交通システム研究会.
- [2] H. Ishikawa, H. Shinonaga and H. Kobayashi, "Carrier Frequency Offset-Spread Spectrum (CFO-SS) Method for Wireless LAN System Using 2.4 GHz ISM Band," IEICE Trans. on Fundamentals, pp.2366-2371, Vol. E80-A, No.12, Dec. 1997.
- [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.