

首都圏ATACS無線装置の開発



栗田 明*



中井 義*



大森 裕明*



立石 幸也*

従来の列車制御システムは、地上設備による制御が主体であり、コストの低減、より一層の安全性の向上、新たなサービスの提供などの面で課題が残されている。そこで当社は、情報通信技術を活用した安全・シンプルな列車制御システムATACS（Advanced Train Administration and Communications System）を開発した。ATACSは、2011年10月より仙石線において実運用を開始した後、現在に至るまで安定した運用が行われている。そこで現在、ATACSの首都圏導入について検討を進めている。

首都圏導入に向けた課題として、都市環境による電界変動の増大や電波弱電界地帯の発生、電波オーバーリーチによる電波干渉の発生などがあげられる。本稿では、これらの課題に対応するために実施した首都圏ATACS無線装置の開発について述べる。性能評価の結果、首都圏ATACS無線装置では、従来の必要機能を維持しつつ、首都圏導入に向けた上記課題に対する耐性を改善できることが明らかとなった。

●キーワード：列車制御、デジタル無線、車上位置検知、信頼性、移動体通信

1. はじめに

鉄道が開業して以来、鉄道の安全と効率的な輸送を実現するためのさまざまな仕組みが開発されてきた。しかしながら、従来の仕組みは地上設備による制御が主体であり、コストの低減、より一層の安全性の向上、新たなサービスの提供などの面で課題が残されている。

ATACSは、従来の地上設備を主体とした鉄道制御システムのフルモデルチェンジを目的として、情報通信技術をベースに地上・車上の制御分担を機能面から再配置した、安全・シンプルな新しい列車制御システムである¹⁾。従来の軌道回路に替わり、無線通信を活用して地上-車上間の情報伝送を行うことで、列車制御を実現している。

当社は、1995年にATACSの開発に着手して以降、プロトタイプ試験や現車による走行試験を行い^{2) 3)}、2011年10月より、仙石線あおば通駅～東塩釜駅においてATACSの実運用を開始した。実運用を開始した後、現在に至るまで安定した運用が行われている。

この仙石線での安定した運用実績を受け、ATACSの首都圏導入について検討を進めている⁴⁾。首都圏導入に向けた新たな課題として、都市環境による電界変動の増大や電波弱電界地帯の発生、電波オーバーリーチによる電波干渉の発生などがあげられる。そこで、これらの課題に対応するために、新しい無線技術を採用した首都圏ATACS無線装置の開発を実施した。

2. 列車制御に必要な要素

列車制御は、以下の3要素により実現される。これら3要素は、列車が軌道上を走行するという鉄道の本質に変化

がない限り、今後も変わることはないと考えられる。

- (1) 検知：列車などの位置を検知
- (2) 伝達：検知した位置情報をほかの列車、地上装置などへ伝達、信号機などの情報を運転士が目視で確認
- (3) 制御：受信した位置情報に基づき列車の速度、進路、踏切警報などを制御

以下に、従来の列車制御システムにおける3要素の実現方法と、ATACSにおける3要素の実現方法について示す。

2.1 検知（列車位置検知）

(a) 従来の列車制御システム

従来の列車制御システムでは、レールの短絡により列車の位置を検知する軌道回路を用いている。本手法には以下のような課題が存在する。

- ・軌道回路のメンテナンスコストが大きい
- ・軌道回路の区間長の変更に時間とコストを要する

(b) ATACS

上記課題に対応するために、列車の位置検知は、地上側ではなく車上側で実施する車上位置検知方式を採用している。

2.2 伝達

(a) 従来の列車制御システム

従来の列車制御システムでは、運転士が信号機や標識などを目視で確認することにより運転に必要な情報を得ている。本手法には以下のような課題が存在する。

- ・信号機などの地上設備のメンテナンスコストが大きい
- ・速度向上や運転時隔の短縮を行う際、信号機の表示変更や信号機の移設などを伴う場合があり、時間とコストを要する

(b) ATACS

上記課題に対応するために、地上-車上間の情報伝送を無線通信により行い、信号情報を車内に表示する方式を採用することで、地上信号機を不要としている。

2.3 制御

(a) 従来の列車制御システム

従来の列車制御システムでは、軌道回路をベースとした膨大な地上設備とリレーロジックによる制御を行っている。本手法には以下のような課題が存在する。

- ・線路の配線変更に伴う切替工事に時間とコストを要する
- ・踏切の警報開始地点を一定にしているため、列車の速度により警報時間にばらつきが生じる
- ・制御のための膨大な量のケーブルの管理が必要

(b) ATACS

上記課題に対応するために、軌道回路をベースとする膨大な地上設備とリレーロジックによる制御に替えて、コンピュータと簡単な論理による制御を実現している。

3. ATACS の無線仕様

ATACSでは、地上に設置する無線基地局と、車上に設置する車上無線局の間で無線通信を行うことにより、列車制御を実現している。A→B（基地局→車上局）の通信に関しては、1周期（960msec）を16個の時間スロット（1スロット：60msec）に分割したうえで、そのうち12スロットを列車制御用として使用し、4スロットを線路データベースバージョンなどの情報伝送用として使用している。また、B→A（車上局→基地局）の通信に関しては、1周期（960msec）を12スロット（1スロット：80msec）に分割し、列車位置、列車長、踏切制御情報などを伝送している。本スロット構成により、1つの無線基地局あたり、上下線で12列車の制御を可能としている。また、誤り検出符号や誤り訂正符号を用いることにより、安定した無線通信品質を実現している。

表1に、ATACSの無線仕様について示す。

表1 ATACSの無線仕様

変調方式	$\pi/4$ シフトQPSK
使用周波数帯	352、336MHz 帯
占有周波数帯域幅	5.8kHz
伝送速度	9.6kbps
アクセス方式	TDMA
基地局出力	3W
車上局出力	1W
誤り検出符号	CRC
誤り訂正符号	リードソロモン符号
制御列車数	12 列車
伝送情報量	576bit (うち列車制御情報 312bit)

※QPSK・・・Quadrature Phase Shift Keying
 ※TDMA・・・Time Division Multiple Access
 ※CRC・・・Cyclic Redundancy Check

4. 首都圏 ATACS 導入に向けた課題

図1に、首都圏ATACS導入に向けた課題を示す。導入に向けた課題として、都市環境による電界変動の増大、電波弱電界地帯の発生、ビート干渉の発生、電波オーバーリーチによる電波干渉の発生があげられる。以下、各課題について具体的に説明する。

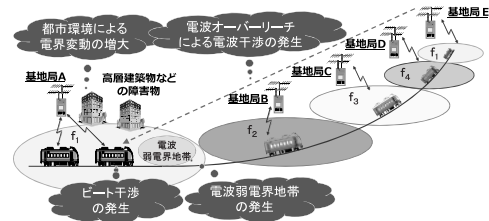


図1 首都圏ATACS導入に向けた課題

(a) 都市環境による電界変動の増大

首都圏は高層建築物が多いことから、電波の反射による影響が大きく、また、都市雑音の影響も想定される。したがって、仙石線の環境と比較して電界変動が増大すると考えられる。

(b) ビート干渉の発生

図2に、ビート干渉の概念図を示す。ビート干渉とは、異なる基地局から同一の信号を送信した場合に、車上局において、双方の信号が同一振幅かつ逆位相で打ち消しあうことにより、通信品質の劣化が発生する現象のことである⁵⁾。首都圏においては、電波弱電界地帯に対する対策の1つとして、光中継を活用したサテライトアンテナ（後述）の設置を考えている。その場合、基地局からの送信信号と、サテライトアンテナからの送信信号の間でビート干渉が発生し、局所的に通信品質の劣化が発生する可能性がある。

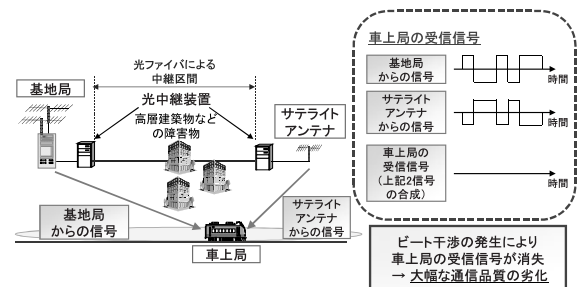


図2 ビート干渉の概念図

(c) 電波オーバーリーチによる電波干渉の発生

図3に、ATACS無線システムで発生する電波オーバーリーチによる電波干渉の概念図を示す。ATACSの無線システムでは、4つの周波数の繰り返しにより周波数配置が行われる。そのため、各基地局のA→B（基地局→車上局）の通信は、4局離れた基地局と同一周波数を使用することとなり、電波オーバーリーチによる同一周波数の電波干渉

が発生する。

首都圏においては、複数線区が密に存在していることから、仙石線の環境よりも、干渉局がより近くに存在する場合が想定される。したがって、首都圏においては、この電波オーバーリーチによる電波干渉の影響がより顕著となる可能性がある。

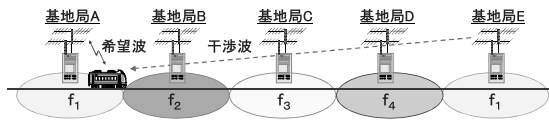


図3 電波オーバーリーチによる電波干渉の概念図

(d) 電波弱電界地帯の発生

首都圏は高層建築物が多いことから、仙石線の環境と比較して、電波の遮蔽により局所的な電波弱電界地帯が発生する可能性が高いと考えられる。

5. 首都圏 ATACS 無線システムの諸元

表2に、首都圏ATACS無線システムの諸元を関連諸元と比較して示す。首都圏導入に向けた課題に対応するために、首都圏ATACS無線装置では、在来線デジタル列車無線システムで採用している送信ダイバーシチ技術と適応等化技術を搭載した。また、電波弱電界地帯に対する対策の1つとして、光中継を活用したサテライトアンテナの検討を実施した。

表2 首都圏ATACS無線システムの諸元

	首都圏 ATACS	仙石線 ATACS	在来線デジタル列車無線
変調方式	$\pi/4$ シフト QPSK	$\pi/4$ シフト QPSK	$\pi/4$ シフト QPSK
使用周波数帯	352、336MHz 帯	352、336MHz 帯	352、336MHz 帯
占有周波数帯幅	5.8kHz	5.8kHz	5.8kHz
伝送速度	9.6kbps	9.6kbps	9.6kbps
電界変動対策	送信ダイバーシチおよび適応等化	なし	送信ダイバーシチおよび適応等化
電波弱電界地帯対策	光中継を活用したサテライトアンテナ	なし	なし

(a) 送信ダイバーシチおよび適応等化

図4に、送信ダイバーシチおよび適応等化の概念図を示す。送信ダイバーシチとは、基地局に設置する複数のアンテナから信号を送信することで、車上局における電界変動を抑圧するための技術である。このとき、片方のアンテナからは、もう一方のアンテナと送信タイミングを変えて同一データの送信を行うことで、前述したビート干渉への耐性を改善することが可能となる。

また、適応等化とは、受信機における信号処理により、遅延波の影響を抑圧するための技術である。

(b) 光中継を活用したサテライトアンテナ

電波弱電界地帯に対する対策の1つとして、光中継を活用したサテライトアンテナの検討を実施した。図5に、その概念図を示す。基地局のアンテナから信号を送信するとともに、その

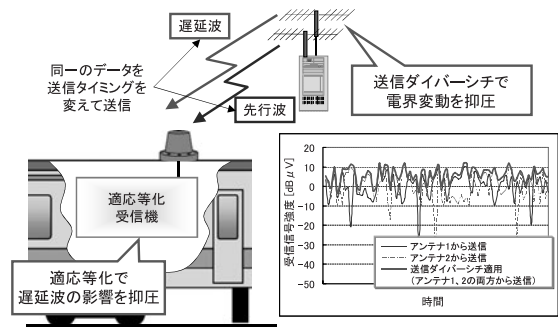


図4 送信ダイバーシチおよび適応等化の概念図

送信信号の一部（局所的な電波弱電界地帯を補完可能な電力分）を光伝送により中継し、電波弱電界地帯のサテライトアンテナから同時に送信する。また、サテライトアンテナで車上局から受信した信号を、光伝送により基地局まで中継する。本構成を用いることにより、車上局は、電波弱電界地帯においても安定した信号の送受信が可能となる。

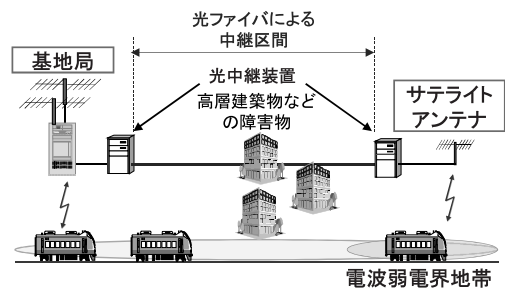


図5 サテライトアンテナの概念図

6. 首都圏 ATACS 無線装置の開発

表3に、首都圏ATACS無線装置の開発工程を示す。以下、各開発内容について説明する。

(a) 無線装置の開発

送信ダイバーシチおよび適応等化の機能を搭載した首都圏 ATACS無線装置の開発を実施した。送信ダイバーシチに関しては、基地局側の無線機で有り/無しの設定が行える構成とし、適応等化に関しては、車上局側の無線機で有り/無しの設定が行える構成とした。また、誤り訂正符号長を変化させた場合の性能評価を行うために、誤り訂正符号長を128/96/64bitの中から選択できる構成とした。なお、仙石線 ATACSにおいては、誤り訂正符号長128bitで運用を行っている。

(b) 試験装置の開発

首都圏ATACS無線装置の試験データ収集、解析を行うための試験装置の開発を実施した。

(c) 無線制御装置の開発

首都圏ATACS無線装置を制御するための無線制御装置の開発を実施した。

(d) フィールド試験

2012年2月～2013年1月にかけて、埼京線において試験列車を用いたフィールド試験を行い、首都圏ATACS無線装置の性能評価を実施した。

表3 首都圏ATACS無線装置の開発工程

	2010年度	2011年度	2012年度
仙石線 ATACS		2011/10 実運用開始	
首都圏 ATACS	無線装置	設計	機能評価
	試験装置	設計	性能評価
	無線制御装置		設計
	フィールド試験		試験

7. 首都圏 ATACS 無線装置の評価

7.1 ビート干渉に対する耐性評価

(a) 評価内容

ビート干渉に対する送信ダイバーシチおよび適応等化の有効性を確認するために、装置対向の有線接続試験により、首都圏ATACS無線装置の性能評価を実施した。

評価対象はA→B（基地局→車上局）の通信とし、通信条件は、フェージング周波数 $f_d=0\text{Hz}$ （列車静止環境に相当）、誤り訂正符号長128bitに設定した。

なお、通信条件として列車静止環境を想定した理由について説明する。これは、ビート干渉は列車走行環境でも発生するが、有線接続試験において、ビート干渉に対する耐性を評価するための十分な評価ビット数を確保するためには、無線環境が変動しやすい列車走行環境よりも、持続的なビート干渉環境が構築しやすい列車静止環境で試験を行う方が適しているためである。

(b) 評価結果

図6に評価結果を示す。同図において、縦軸はビット誤り率（BER: Bit Error Ratio）を表し、値が小さいほど通信品質が良好であることを表している。システムの感度点は $\text{BER}=10^{-4}$ であるが、回線設計のマージンを考慮して、 $\text{BER}=10^{-5}$ の点で評価を実施した。

同図より、送信ダイバーシチおよび適応等化を用いることにより、 $\text{BER}=10^{-5}$ の点で約11dB性能が良好となり、ビート干渉に対する耐性を改善できることが明らかとなった。

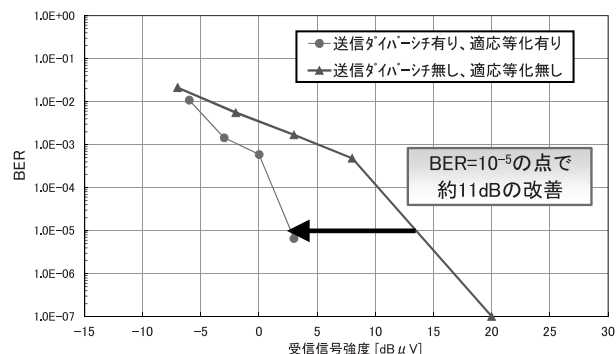


図6 送信ダイバーシチおよび適応等化に関する有線接続試験結果（ビート干渉環境下、 $f_d=0\text{Hz}$ （列車静止環境に相当）、誤り訂正符号長128bit、A→B通信）

7.2 電波オーバーリーチの電波干渉に対する耐性評価

(a) 評価内容

首都圏ATACS無線装置を用いて、電波オーバーリーチによる電波干渉への耐性を評価した。具体的には、装置対向の有線接続試験において、車上局の本来の受信信号に同一周波数の干渉信号を付加することで、無線装置の電波干渉への耐性を評価した。

評価対象はA→B（基地局→車上局）の通信とし、通信条件は、フェージング周波数 $f_d=20\text{Hz}$ （列車走行速度約60km/hに相当）、誤り訂正符号長128bitに設定した。

(b) 評価結果

図7に評価結果を示す。同図において、横軸のD/Uは、希望波（Desired波）と干渉波（Undesired波）の電力の比を表し、D/Uの値が大きくなるほど、干渉波に対する希望波の電力比が大きく、干渉波の影響が少ない環境であることを表している。

同図より、送信ダイバーシチおよび適応等化を用いることで性能が改善し、電波干渉の影響がほぼ無視できることを意味するエラーフリー（ $\text{BER}=10^{-7}$ 未満）を実現するD/Uが約22dB→18dBとなり、電波オーバーリーチによる電波干渉への耐性を約4dB改善できることが明らかとなった。

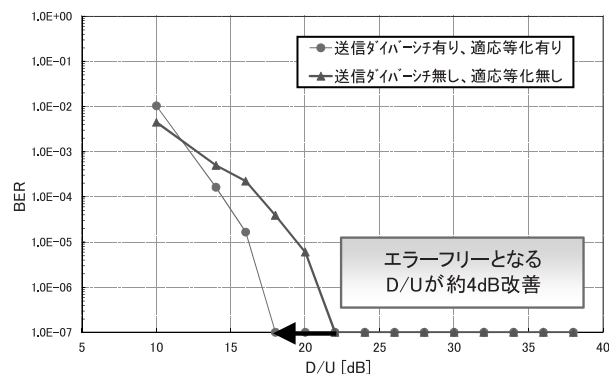


図7 電波オーバーリーチの電波干渉に関する有線接続試験結果（ $f_d=20\text{Hz}$ （列車走行速度約60km/hに相当）、誤り訂正符号長128bit、A→B通信）

7.3 誤り訂正符号長に関する評価

(a) 評価内容

誤り訂正符号とは、通信路上で発生したビット誤りを受信側において訂正するための符号のことである。送信側においては、本来送るべき情報フレームに対して冗長な符号ビットを付加して送信し、受信側においては、この符号ビットを活用することで誤り訂正処理を実現する。情報フレームに対して付加する符号長（誤り訂正符号長）が長いほど、誤り訂正能力としては高くなるものの、1フレームで送信可能な情報量が少なくなる。つまり、誤り訂正能力（伝送品質）と伝送効率はトレードオフの関係にある。図8に、その考え方の概念図を示す。

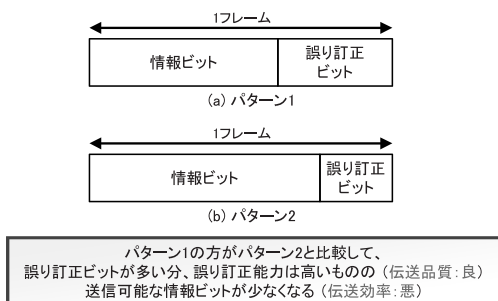


図8 誤り訂正符号長に関する考え方

首都圏ATACS無線装置を用いて、誤り訂正符号長を変化させた場合の性能評価を実施した。評価対象はA→B（基地局→車上局）の通信とし、通信条件は、送信ダイバーシチ有り、適応等化有りに設定した。また、有線接続試験結果についてはフェージング周波数 $f_d=20\text{Hz}$ （列車走行速度約 60km/h に相当）に設定した。

(b) 評価結果

図9に評価結果を示す。同図より、 $\text{BER}=10^{-5}$ の点で誤り訂正符号長128bitの性能と比較すると、誤り訂正符号長96bitでは約1.5dB、64bitでは約4dBの性能劣化が発生することが明らかとなった。本劣化量が許容可能かに関しては、システムの回線設計に関する詳細検討が必要である。

また、フィールド試験結果と有線接続試験結果の間に性能差が確認された。これは、フィールド試験では車上雑音の影響が加わることや、両者の列車走行速度に差異があることなどが原因として考えられる。なお、具体的な列車走行速度としては、有線接続試験結果は列車走行速度約 60km/h 相当（一定速度）の特性であるのに対して、フィールド試験結果は列車走行速度が変動する条件下（平均速度：約 50km/h 、最高速度：約 80km/h ）の特性となっている。

7.4 光中継を活用したサテライトアンテナの評価

(a) 評価内容

光中継を活用したサテライトアンテナが、電波弱電界地帯に

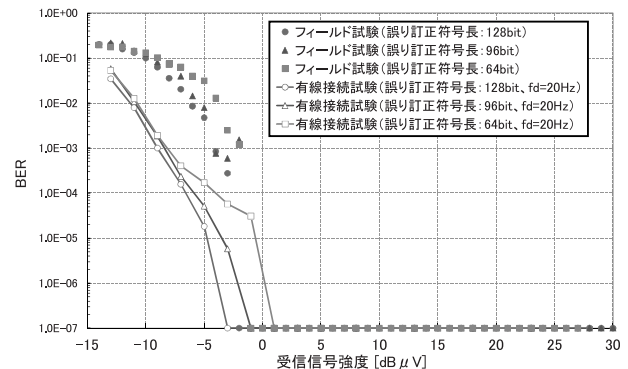


図9 誤り訂正符号長に関する試験結果
（送信ダイバーシチ有り、適応等化有り、A→B通信）

対する対策として有効であることを確認するため、フィールド試験を実施した。図10に、サテライトアンテナを用いたフィールド試験構成を示す。池袋基地局のアンテナから信号を送信するとともに、その送信信号の一部（局所的な電波弱電界地帯を補完可能な電力分）を光伝送により中継して、板橋サテライトアンテナ（池袋基地局から約 1.2km の距離に設置）から同時送信することにより、板橋付近の受信信号強度が増大するか評価を実施した。また、池袋基地局アンテナと板橋サテライトアンテナから同時送信を行うことで、相互の干渉による性能劣化が発生しないか評価を実施した。

通信条件は、誤り訂正符号長128bit、送信ダイバーシチ有り、適応等化有りに設定した。

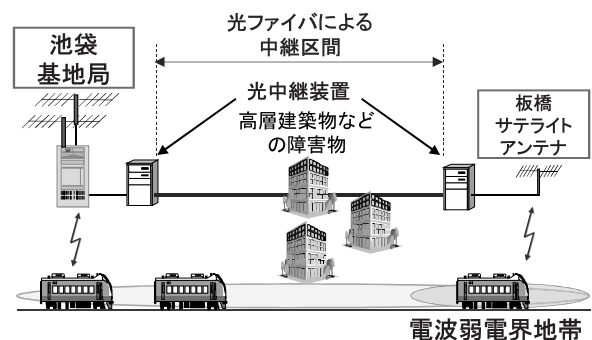


図10 サテライトアンテナを用いたフィールド試験構成

(b) 評価結果

図11に、受信信号強度に関するA→B（基地局→車上局）のフィールド試験結果を示す。光中継を活用したサテライトアンテナを用いることにより、板橋付近の受信信号強度が $20\sim 30\text{dB}$ 程度増大することが確認された。

また、図12に、通信品質に関するA→B（基地局→車上局）のフィールド試験結果を示す。同図より、池袋基地局アンテナのみを使用した場合と比較して、サテライトアンテナの同時送信による性能劣化はほとんど無いことが確認された。

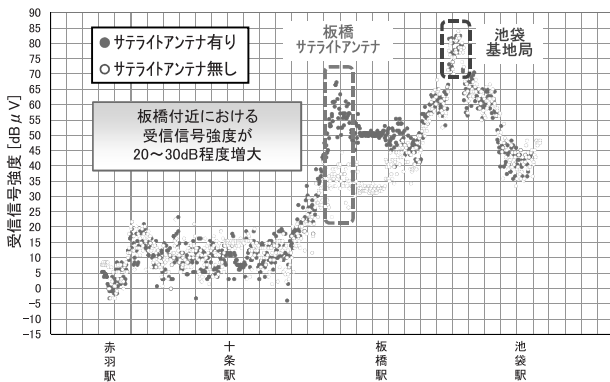


図11 サテライトアンテナ有無による受信信号強度比較

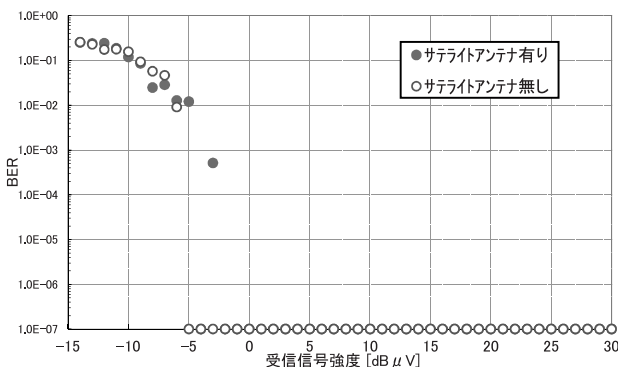


図12 サテライトアンテナ有無による通信品質比較
(誤り訂正符号長128bit、送信ダイバーシチ有り、適応等化有り、A→B通信)

以上の評価結果より、A→B（基地局→車上局）に関しては、光中継を活用したサテライトアンテナにより、基地局の通信品質にほとんど影響を与えることなく、受信信号強度を増大させることが明らかとなった。

一方、別途実施したB→A（車上局→基地局）のフィールド試験結果において、サテライトアンテナ使用時に約3dBの性能劣化が確認された。これは、基地局の受信信号に、光中継による遅延が加わったサテライトアンテナの受信信号が合成された影響と考えられる。本劣化量は、光伝送の遅延量に依存して変わることが想定され、さらなる詳細評価を実施するとともに、基地局側で遅延波の影響を抑圧するなどの対策が必要と考えられる。

7.5 複数基地局を用いたハンドオーバー評価

(a) 評価内容

首都圏ATACS無線装置で送信ダイバーシチを用いる場合、片方のアンテナから送信タイミングを変えて送信を実施する。このことが仙石線ATACSで実現しているハンドオーバー機能に影響を与えないか確認するために、フィールド試験を実施した。具体的には、池袋基地局と新赤羽基地局との間にハンドオーバー点を設定し、想定するハンドオーバー点においてハンドオーバー処理が実現できるか評価を実施した。

通信条件は、誤り訂正符号長128bit、送信ダイバーシチ有り、適応等化有り等に設定した。

(b) 評価結果

フィールド試験の結果、首都圏ATACS無線装置で送信ダイバーシチおよび適応等化を用いた場合でも、設定したハンドオーバー点で、車上局がハンドオーバーエリアに進入したことを検知し、問題なくハンドオーバー処理が実現できることを確認した。

7.6 首都圏ATACS無線装置評価のまとめ

首都圏ATACS無線装置を開発し、その性能評価を実施した結果、以下の内容が明らかとなった。

- (1) 送信ダイバーシチおよび適応等化を用いることで、ビート干渉および電波オーバーリーチによる電波干渉に対する耐性が改善する。
- (2) 誤り訂正符号長を短くするにしたがって性能が劣化する。本性能劣化が許容可能かに関しては、システムの回線設計に関する詳細検討が必要である。
- (3) 光中継を活用したサテライトアンテナは、A→B（基地局→車上局）に関しては受信信号強度を増大可能であるものの、B→A（車上局→基地局）に関してはさらなる詳細評価が必要である。
- (4) 首都圏ATACS無線装置で送信ダイバーシチおよび適応等化を用いた場合でも、仙石線ATACSと同様にハンドオーバー処理が実現できる。

8. おわりに

本稿では、ATACSの首都圏導入に向けて開発した無線装置の概要、および性能評価結果について報告した。今後は、首都圏ATACSの早期実用化に向けた取組みを進めていく予定である。

参考文献

- 1) 馬場裕一ほか：無線による列車制御システム（ATACS），JR EAST Technical Review, No.5, pp.31-38, Autumn 2003.
- 2) 立石幸也ほか：無線による列車制御システム ATACS プロトタイプ試験結果，JR EAST Technical Review, No.12, pp.40-51, Summer 2005.
- 3) 黒岩篤ほか：仙石線におけるATACSの実用化，JR EAST Technical Review, No.28, pp.41-46, Summer 2009.
- 4) 中村泰之：次世代の首都圏鉄道システムの概要，JR EAST Technical Review, No.36, pp.3-6, Summer 2011.
- 5) 久保博嗣ほか：送信ダイバーシチと適応等化器によるビート干渉抑圧方式に関する一検討，信学論（B），vol.J86-B, no.3, pp.468-476, March 2003.