低遅延型デジタル特定ラジオマイク伝送方式の開発

Development of Low-Latency Digital Transmission System for Specified Radio Microphone

正会員 田口 誠^{†1}, 水口敏博^{†2}, 阿部健彦^{†3}, 正会員 濱住啓之^{†1}
Makoto Taguchi^{†1}, Toshihiro Mizuguchi^{†2}, Takehiko Abe^{†3} and Hiroyuki Hamazumi^{†1}

あらまし 現在、770～806 MHzで利用されている特定ラジオマイクに対し、周波数の移行が求められている。移行先の周波数帯は、470～714 MHz, 1240～1260 MHz (1252～1253 MHzは除く)とする一部答申が情報通信審議会から行われた。このような状況下で、筆者らは移行先の新たな周波数帯 (1.2 GHz帯)において、マイクの音声信号を低遅延、高品質、かつ安定した伝送が可能なデジタル伝送方式を検討してきた。耐干渉性に優れたOFDM伝送方式をラジオマイクに初めて適用し、音声非圧縮のリニアPCM信号のデジタル伝送方式を実現するとともに、伝送帯域幅600 kHz以下で、伝送遅延時間が1 msを下回るデジタル伝送を実現した。

キーワード：ラジオマイク、低遅延、リニアPCM、瞬時圧伸、OFDM、デジタル伝送

1. ま え が き

特定ラジオマイクとは、テレビ局のスタジオや舞台、コンサートホールなどで業務用途に用いられているワイヤレスマイクのことである。現在、特定ラジオマイクは770～806 MHzの周波数帯で利用されており、周波数変調 (FM: Frequency Modulation) によるアナログ¹⁾方式と、主に位相変調 (PSK: Phase Shift Keying) によるデジタル方式²⁾の2種類が製品化されている。どちらもシングルキャリア方式である。アナログ方式の特長は、音声の遅延がほとんどないことである。これに対してデジタル方式は、圧縮・伸長処理を行っており、3～5 ms程度の遅延があるものの、音質が良いこと、雑音や干渉に強いこと、アナログ方式と比較して、より多くのマイクを同時に利用できるなどの特長がある。しかしながら、伝送遅延時間が1 msを超えると音楽などの演奏に与える影響が無視できなくなるという課題に対し、1 msを下回るような低遅延型デジタル方式のラジオマイクはこれまで実在せず、検討された例もなかった。

一方、平成16年には、総務省から「周波数再編アクションプラン³⁾」が公表され、電波の有効利用という観点から周波数再編の検討が進められている。平成23年9月に公表された周波数再編アクションプランの見直しにより、特定ラジオマイクは地上テレビジョン放送用周波数帯のホワイト

スペース、または1.2 GHz帯への周波数移行が検討されることとなった。これを受けて技術条件等の検討が行われ、平成24年4月には情報通信審議会から特定ラジオマイクの移行先周波数は470～714 MHz, 1,240～1,260 MHz (1,252～1,253 MHzは除く)とする一部答申が行われている。

このような状況で、筆者らは移行先の新たな周波数帯において、マイクの音声信号を低遅延、高品質かつ安定した伝送を実現するため、耐干渉性に優れたOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 伝送方式をラジオマイクに適用する伝送方式を世界に先駆けて検討してきた⁴⁾。本稿では、音声非圧縮のリニアPCM信号を、1 msを下回る遅延で、伝送帯域幅600 kHz以下でワイヤレス伝送できるラジオマイク用の伝送方式の検討結果と、実験による実証結果を述べる。

2. デジタルラジオマイクの要求条件

2.1 伝送遅延時間

スタジオやホール等での音の遅延は、音楽演奏に影響を与えていると言われている。近年では、ミキシングした音を演奏者へ送り返すイヤーマニタが積極的に利用され、遅延に対する要求が高くなってきている。演奏者は、人の声や楽器の音を骨伝導も含めて生音を直接聞いており、イヤーマニタからの遅延した音が混じると、音色に影響があると言われている。遅延時間の検知限とその影響については評価実験⁵⁾が行われている。この評価実験によれば、2割程度の演奏者が1 msの遅延を検知でき、マイク、ミキシング卓、イヤーマニタを組合せたシステム全体の遅延時間が5 msを超えると、演奏者全体の8割が遅延を知覚でき、演奏に影響を及ぼすと報告されている。

ITU-R (International Telecommunication Union - Radio

2013年10月28日受付、2013年12月25日採録

^{†1} NHK放送技術研究所

(〒157-8510 世田谷区砦1-10-11, TEL 03-5494-3457)

^{†2} 株式会社NHKアイテック

(〒150-0041 渋谷区神南1-4-1)

^{†3} 株式会社テレビ朝日

(〒106-8001 港区六本木6-9-1)

表1 デジタルラジオマイク・イヤーマニタの要求条件

項目	デジタルラジオマイク (スタジオ)	デジタルインイヤーマニタ
音声信号の周波数特性	20 Hz ~ 20 kHz	20 Hz ~ 15 kHz
音声信号のダイナミックレンジ	100 dB以上 (120 dB以上が望ましい)	95 ~ 100 dB
マイクの最大入力音圧レベル	130 dB SPL以上	—
最大許容遅延時間	1 ms	1 ms
オーディオインターフェース	AES/EBU出力 (受信機)	AES/EBU入力 (送信機)

communication Sector) のレポート⁶⁾に、デジタルワイヤレスマイクに対する要求条件が記載されている。その要求条件の一部を表1に示す。表1によると、スタジオ用デジタルラジオマイクの場合、音声信号の周波数特性は20 Hz ~ 20 kHz、ダイナミックレンジ100 dB以上、最大遅延時間1 msとなっている。インイヤーマニタ (本稿イヤーマニタと同義) については、音声周波数やダイナミックレンジなど音声品質が多少制限されているものの、1 ms以下の低遅延伝送が求められている。

以上のことから、ラジオマイクとイヤーマニタの伝送遅延時間をそれぞれ1 ms以下とすれば、近年主流となっているデジタル方式のミキシング卓の処理遅延2~3 msを考慮しても、システム全体の遅延を5 ms以下とすることができ、遅延による演奏者等への影響が軽減できる。

2.2 伝送帯域幅

欧州のETSI (European Telecommunications Standards Institute) に、25 MHz ~ 3 GHz帯のワイヤレスマイクの特性測定に関する規格⁷⁾がある。この規格で伝送帯域幅についての記述があり、送信周波数が1 GHzまでの伝送帯域幅は最大で200 kHz、送信周波数が1 GHz以上は最大で600 kHz以下と記載されている。

2.3 回線設計

回線設計を行うにあたり、ラジオマイクの形状の違いを考慮した。代表的な形状は2種類あり、マイクと送信機が一体となったハンド型と、それぞれが分離した2ピース型がある。いずれも人体近傍で使用される。ラジオマイクのアンテナ放射特性に対する人体の影響について、数値人体モデルを用いて検討⁸⁾した。検討の結果、1.2 GHz帯の人体による遮蔽損は、ハンド型で14.5 dB、2ピース型で18.5 dBとした。16QAM-OFDMで、誤り訂正の符号化率2/3の所要CNRを13.8 dB、QPSK-OFDMの所要CNRを7.5 dBとして回線設計を行った。その回線設計例を表2に示す。

人体による遮蔽損を考慮した受信電力 (ア) より受信機熱雑音 (イ) と、受信機の固定劣化4 dB、フェージングマージン⁸⁾を減算すると受信C/N (ウ) や (エ) が求められる。これと所要C/Nを比較すると、伝送距離100 m時には受信アンテナのブランチ数を4とすることで、所要C/Nを上回り、回線設計が成立する見込みが得られた。

2.4 要求条件のまとめ

前述のように、デジタルラジオマイクへの要求を考慮し、提案する低遅延デジタルラジオマイク伝送方式は、以下項目を要求条件として方式の検討を進めることとした。

表2 低遅延型デジタル特定ラジオマイクの回線設計例
(伝送距離100 m, 16QAM-OFDM, 50 mW出力)

項目	ハンド型	2ピース型
送信周波数 (MHz)	1250	1250
送信アンテナ高 (m)	1.5	1.5
受信アンテナ高 (m)	1.5	1.5
送信出力 (dBm)	17	17
送信アンテナ利得 (dBi)	0.85	0.85
実効放射電力 (dBm)	17.85	17.85
自由空間損失 (dB) (伝送距離100 m)	74.4	74.4
人体による遮蔽損 (dB)	14.5	18.5
受信アンテナ利得 (dBi)	2.14	2.14
(ア) 受信電力 (dBm)	-68.9	-72.9
ボルツマン定数 (dBm/(Hz・K))	-198.6	-198.6
標準温度 (dBK)	25	25
信号帯域幅 (dBHz)	57.8	57.8
受信機雑音指数 (dB)	6	6
(イ) 受信機熱雑音 (dBm)	-109.8	-109.8
受信機の固定劣化 (dB)	4	4
2ブランチ受信時の フェージングマージン (dB)	23.5	23.5
4ブランチ受信時の フェージングマージン (dB)	8.9	8.9
所要C/N (dB)	13.8	13.8
(ウ) 2ブランチ受信時の 受信C/N (dB)	13.4	9.4
(エ) 4ブランチ受信時の 受信C/N (dB)	28.0	24.0

- (1) 伝送遅延時間を1 ms以下とする。
- (2) 非圧縮音声信号を伝送することが可能。
- (3) 伝送距離を最大で100 mとする。

3. 低遅延型伝送方式の検討

3.1 リニアPCM伝送

マイクの音声信号を低遅延伝送するため、非圧縮音声信号であるリニアPCMの伝送を検討した。サンプリング周波数48 kHz、量子化ビット数を24ビットのリニアPCM信号とすると、情報レートは1,152 kbpsとなり、従来のデジタルラジオマイクより4倍以上のレートになる。このため、変調の多値化による周波数利用効率の点で優れ、マルチパスに対する耐性を併せ持つOFDM変調技術 (マルチキャリア伝送) を基本として伝送方式の検討を進めた。

3.2 伝送遅延時間の検討

OFDM変調による伝送方式で、伝送遅延時間を低減するため、短いOFDMシンボル長を選択し、ビット単位の処理で誤り訂正符号の符号長を短くすることで、FFTや誤り訂正に要するパッファ時間を削減する工夫をした。また、

表3 伝送遅延時間の算出

項目	変数	遅延(μs)	想定根拠
音声AD変換	τ_{AD}	120	実績値
FFT	τ_{FFT}	83.3	T_s
送信フィルタ	τ_{Filter}	39.2	64タップ FIRフィルタ
IF信号 DA変換	τ_{IFDA}	6	実績値
IF信号 AD変換	τ_{IFAD}	6	実績値
IFFT	τ_{IFFT}	83.3	T_s
等化処理	τ_{EQ}	83.3	T_s
ビタビ復号	τ_{path}	58.2	実績値
音声DA変換	τ_{DA}	350	実績値
合計		829	

これらシンボル長や符号長を非圧縮音声信号のサンプル長の整数倍とすることで、信号処理時に生じるバッファ時間を最小限に抑えた。

次に、本方式による伝送遅延時間について机上で算出した。送信側の遅延を τ_{TX} 、受信側の遅延を τ_{RX} とすると、 τ_{TX} 、 τ_{RX} は次式のように表すことができる。

$$\tau_{TX} = \tau_{AD} + \tau_{FFT} + \tau_{Filter} + \tau_{IFDA}$$

$$\tau_{RX} = \tau_{IFAD} + \tau_{IFFT} + \tau_{EQ} + \tau_{path} + \tau_{DA}$$

表3に、伝送遅延時間の算出に使用した各変数と遅延時間を示す。表3によると、伝送遅延時間の合計は829 μsとなり、1 ms以下の要求条件を満たす見込みが得られた。

3.3 伝送モードの検討

前項記載の要求条件を満たしつつ、さまざまな使用状況を想定し、低遅延型デジタル特定ラジオマイク伝送方式は以下の三つの伝送モードを有するものとした。それぞれの伝送モードおよび伝送パラメータを表4に示す。

標準マイクの伝送モードでは、非圧縮のリニアPCMの

音声信号を16QAM-OFDMにより伝送するモードである。

高耐干渉マイクの伝送モードでは、瞬時圧伸あるいは、ADPCMにより情報量を削減し、QPSK-OFDMにより伝送することで雑音や干渉への耐性を強くした伝送モードである。瞬時圧伸とは、 μ 法則⁹⁾などの対数特性を近似した曲線を用いて音声の入出力振幅特性をデジタル的に操作して情報を圧縮・伸長するもので、アナログ方式のラジオマイクで使用されているコンパンダと似た手法である。少ない遅延で圧縮・伸長できるのが特長である。

イヤーマニタの伝送モードでは、出演者への指示や問いかけ、または演奏者への音声モニタ用に音声を送送するためのモードである。これには、用途に応じて瞬時圧伸やADPCMによる情報量削減を行い、2チャンネルのステレオ音声を送16QAM-OFDMにより伝送するモードである。

3.4 伝送パラメータの検討

低遅延型デジタル特定ラジオマイクは、高品質な音声伝送と耐干渉性を併せ持つ必要がある。

(1) OFDMシンボル長

OFDMシンボル長は伝送遅延時間に対して影響を与えるのでできるだけ短くすることが望ましい。しかしながら伝搬路のマルチパスに対する耐性を確保するためには、想定されるマルチパスの最大遅延時間の約10倍以上のシンボル長にする必要がある。また、装置化にあたっては遅延の増加をできるだけ回避するため、信号処理時に生じるバッファメモリを最小限に抑える必要がある。これらを考慮してサンプリング周波数48 kHzの非圧縮音声信号のサンプル長の整数倍(4倍)の約83.3 μsをOFDMシンボル長とした。

表4 デジタルラジオマイク・イヤーマニタの伝送パラメータ

伝送モード		標準マイク		高耐干渉マイク		イヤーマニタ	
情報源符号化	アナログ音声信号	モノラル		モノラル		ステレオ	
	量子化ビット数 (bit)	24		24		24+24	
	サンプリング周波数 (kHz)	48		48		48	
	情報圧縮	非圧縮	非圧縮	瞬時圧伸	圧縮 ⁽⁹⁾	瞬時圧伸	圧縮 ⁽⁹⁾
	音声ビット数 (bit)	24	19	12	9	12+12	9+9
	付加情報ビット数 (bit)	2	0.5	1	0.75	2	1.5
	音声レート (kbps)	1152	912	576	432	1152	864
	付加情報レート (kbps)	96	24	48	36	96	72
	誤り訂正符号	畳み込み符号		畳み込み符号		畳み込み符号	
	符号化率 r	2/3	1/2	2/3	1/2	2/3	1/2
伝送路符号化	キャリア変調	16QAM		QPSK		16QAM	
	三次変調			OFDM			
	シンボル長 T_s			83.33μs			
	有効シンボル長 T_u			78.43μs			
	ガードインターバル T_g (GI比)			4.90μs (1/16)			
	キャリア間隔 Δf (kHz)			12.75			
	キャリア数	総数		46			
		データ		39			
		SP		3			
		TMCC		3			
		CP		1			
	伝送帯域幅 (kHz)			586.50			
	インターリーブ			ビット、周波数			

(2) ガードインタバル (GI) 長

ラジオマイクは、スタジオやホール等の閉空間で利用されるので、マルチパスの影響を考慮しなければならない。大規模ホールにおいては、後述するように1~4 μs のマルチパスが観測されることを考慮し、これに対する充分なガードインタバル長として、約4.9 μs とした。これにより有効シンボル長は、約78.4 μs となる。

(3) FFTクロック周波数

サブキャリア総数を46本としたので、FFTサイズは64または128でOFDMシステムを構築できる。ここではイメージ除去フィルタの設計の難しさを緩和できるのでFFTサイズを64ではなく128とした。したがって、FFTクロック周波数はFFTサイズ(128)を有効シンボル長(約78.4 μs)で除算した1.632 MHzとなる。

(4) 占有帯域幅

サブキャリア間隔 Δf は、有効シンボル長の逆数であるため、12.75 kHzとなり、これにサブキャリア総数の46を乗算することで、占有帯域幅は、586.5 kHzとなる。

3.5 OFDMフレーム構成

図1に提案する低遅延型デジタルラジオマイク伝送方式のOFDMフレーム構成を示す。SP (Scattered Pilot) は、キャリア方向に15キャリアに1回、シンボル方向に5シンボルに1回挿入されている。TMCC (Transmission Multiplexing Configuration Control) は、キャリア番号2, 20, 34の位置に挿入している。帯域の右端にCPが配置され、OFDMフレームは60シンボルで構成されている。

4. 伝送特性の計算機シミュレーション

検討した低遅延型デジタル特定ラジオマイクの伝送方式の伝送特性について、計算機によるシミュレーションを行った。送信側のシミュレーションシステムを図2-1に、受信側を図2-2に示す。このシステムでの特徴をいくつか挙げると、ビットローテーション、受信ブランチ間でサブキャリア毎に最大比合成、さらに誤り訂正に対してもサブキャリアの振幅値に基づくCSI (Channel State Information, チャネル情報) を利用した重み付けを行っている点である。

ビットローテーションとは、地上デジタル放送などで使用されるビットインターリーブの代わりとして導入している。1シンボル内でビット並び替えを実施することにより、余計な遅延を生じさせないようにしている。これらのシステムで、白色ガウス雑音、フェージングに対する伝送特性をシミュレーションした。

4.1 白色ガウス雑音に対する伝送特性

標準ラジオマイク、イヤーマニタの伝送モード(16QAM)を想定し、誤り訂正符号の符号化率2/3, 1/2について、白色ガウス雑音(AWGN)環境における1ブランチあたりの平均受信CNRとビタビ復号後のビット誤り率の関係を図3-1に示す。所要CNRをビタビ復号後の誤り率が 1×10^{-5} を満たすCNRとした。1 br (branch, ブランチ) 受信から4 br

受信とダイバーシティのブランチ数の増加に伴い、所要CNRが4~5 dB改善することを確認できた。符号化率を2/3から1/2へと変更することで、所要CNRが3 dB程度改善することを確認できた。

同様に、高耐干渉マイクの伝送モード(QPSK)を想定したAWGN特性を図3-2に示す。1 br受信から4 br受信とブランチ数を増やすことで約5.5 dBの所要CNR改善が確認できた。符号化率を2/3から1/2へと変更することで、所要CNRが1.5 dB程度改善することを確認できた。

4.2 フェージングに対する伝送特性

次にラジオマイクの移動受信環境を模擬し、6波レイリーフェージング環境でシミュレーションを行った。付加したマルチパスとそのDURを表5に示す。この伝搬モデルは、NHK放送技術研究所内にある技研講堂と呼ばれる多目的ホールで、1.2 GHz帯の伝搬特性を測定した結果に基づいている。最大ドップラ周波数を20 Hzとして計算機シミュレーションを行い、標準ラジオマイク、イヤーマニタを想定した移動受信特性を図4-1に、高耐干渉マイクを想定した移動受信特性を図4-2に示す。図4-1の標準マイク・

図3-1 標準マイク・イヤーマニタ伝送モードのAWGN特性 (16QAM)

図4-1 標準マイク・イヤーマニタ伝送モードのレイリーフェージング特性 (16QAM)

図3-2 高耐干渉マイク伝送モードのAWGN特性 (QPSK)

図4-2 高耐干渉マイク伝送モードのレイリーフェージング特性 (QPSK)

表5 シミュレーションに使用したマルチパス

パス番号	遅延時間 (ns)	DUR (dB)
1	0	0
2	100	-7.5
3	200	-15
4	300	-22.5
5	400	-30
6	500	-37.5

イヤーマニタ伝送モード、図4-2の高耐干渉マイク伝送モードともに、受信ブランチ数の増加に伴い、所要CNRが改善することが確認できた。符号化率を2/3から1/2へと変更することで、所要CNRが3～4 dB程度改善することを確認できた。OFDMのサブキャリアごとに最大比合成を行うダイバーシティ合成受信が、フェージング環境で特に有効であることが確認できた。

5. 実験

低遅延デジタルラジオマイクの混信保護基準やチャネル間隔を策定するため、室内干渉試験を実施した。干渉試験等に使用した、試作実験装置の送信機および受信機の外観写真を図5に示す。図5の実験装置は、表4記載の伝送パラメータのうち、誤り訂正符号の符号化率2/3のパラメータのみ回路実装している。これ以降の実験については、符号化率2/3のみの伝送パラメータで実施している。また、

図5 試作した送信機(左)と受信機(右)

この実験装置でNHK放送センターのスタジオ内および放送センター周辺の屋外にて伝送実験を実施した。

5.1 伝送遅延時間測定

図5に示す試作実験装置の送信機・受信機間を同軸ケーブルで接続し、送信機の入力に400 Hzの正弦波を入力し、受信機出力の音声信号をオシロスコープで波形を観測することで、伝送遅延時間の測定を行った。測定したオシロスコープの波形を図6に、測定した伝送遅延時間をまとめたものを表6に示す。表6の結果から、すべての伝送モードで0.9 msを下回る伝送遅延時間を実現することができた。これは、低遅延型デジタル特定ラジオマイクに求められる要求条件の一つ、「伝送遅延時間1 ms以下」を満足する結果となっている。

5.2 同一チャネル干渉の混信保護比

図7に干渉試験の系統図を示す。低遅延デジタルラジオ

図6 音声信号の時間波形例（標準マイク）

表6 試作実験装置の伝送遅延時間

伝送モード	伝送遅延時間 (ms)
標準マイク (非圧縮・16QAM)	0.80
高耐干渉マイク (瞬時圧伸・QPSK)	0.88
イヤーマニタ (瞬時圧伸・16QAM)	0.81

オマイク送信機2台の送信周波数を1,250 MHzとし、送信出力にアッテネータ（ATT）で所望のDURとなるようレベルを調整し、合成器によって2波を合成した。合成された信号は受信機に入力されるが、受信入力電力は、実験装置の基準感度よりも3 dB高い−83 dBmとした。所要DURは、誤り訂正復号前でBERが 1×10^{-2} 以下（誤り訂正復号後にBERが 1×10^{-5} 以下）となるDURを測定した。

測定の結果、標準マイク伝送モードでは、所要DU比（混信保護比）は17 dBとなり、高耐干渉マイク伝送モードでは、8 dBとなった。

5.3 隣接チャネル選択度特性

今回、チャネル選択度特性を改善する目的で、受信機のIF段に挿入するSAWフィルタを試作し、実装している。SAWフィルタの中心周波数は130 MHz、通過帯域幅600 kHz、OFDMの帯域外を可能な限り除去しつつ、帯域内の群遅延時間差を抑える設計とした。実験装置を用いた隣接チャネル選択度特性の測定は、図7と同じ系統を使用した。1台の送信周波数を1,250 MHzに固定し、もう1台の送信周波数を切替えながら、誤り訂正復号前（ビタビ復号前）のBERが 1×10^{-2} 以下となるDURの逆数をチャネル選択度として測定した。測定した隣接チャネル選択度特性を図8に示す。横軸を送信機2台の離隔周波数とし、縦軸を隣接チャネル選択度とした。離隔周波数700 kHz以上とすることで隣接チャネル選択度30 dB以上確保できることを確認した。

5.4 周波数間隔

低遅延型デジタルラジオマイク伝送方式を検討するにあたり、システム要求条件として伝送距離を最大100 mとしている。ラジオマイクの使用環境を考慮して、受信アンテナ近傍にあるマイクの伝送距離を最短で2 m、最も離れたマイクの伝送距離を最長100 mとした場合、それぞれの自由空間における伝搬損失は、

図7 干渉試験系統図

図8 隣接チャネル選択度特性

距離2 mの伝搬損失 ： −40 dB

距離100 mの伝搬損失： −74 dB

となる。したがって、希望波のラジオマイクが受信アンテナから距離100 mの位置にあり、隣接チャネルの妨害波であるラジオマイクが受信アンテナより距離2 mの位置にある状況を考慮すると、隣接チャネル選択度として、上記伝搬損失の差である34 dBを確保する必要がある。図8の隣接チャネル選択度特性より、標準マイク伝送モード（16QAM）、高耐干渉伝送モード（QPSK）共に隣接チャネル選択度が34 dB以上となる離隔周波数は800 kHzであることから、多数のマイクを周波数軸上で等間隔に配置する場合、2本のマイクの中心周波数の最小周波数間隔を800 kHzとした運用が可能である。

5.5 スタジオ内伝送実験

NHK放送センター内にあるCT-101スタジオで伝送実験を行った。CT-101スタジオは、フロア面積が約350坪ある大スタジオである。CT-101スタジオの実験環境を図9に示す。送信機を腰部に装着した人物がスタジオの長手方向(約35 m)を往復歩行する際の受信電力およびビタビ復号前のビット誤り率（BER）を測定した。同時に1 kHzの正弦波を送信機に入力し、受信側で復調した音声スピーカでモニタしながら測定をした。そのときの伝送実験の諸元を表7に示す。

スタジオ中央を歩行した際の測定結果を図10-1、スタジ

図9 実験環境 (CT-101 スタジオ)

表7 伝送実験諸元

項目	内容
伝送モード	標準マイク (符号化率 r=2/3)
送信周波数 (MHz)	1250
送信出力 (mW)	12.5
送信アンテナ	モノポール
送信高 (m)	地上高 約1
受信アンテナ	ダイポール
受信高 (m)	地上高 2
受信ブランチ数	4
移動速度	歩行程度

図10-1 受信電力とBER特性 (中央歩行時)

図10-2 受信電力とBER特性 (側面歩行時)

オ側面の壁際を歩行した際の測定結果を図10-2に示す。スタジオ側面を歩行した際のBERが、スタジオ中央を歩行したときよりもBERの劣化傾向が表れている。これは、側面歩行時の方が壁面との距離が近く、壁面で反射したDURの低いマルチパスが増えたためと考えられる。しかし、スタジオの中央・側面際を歩行した場合のいずれもビタビ復号前のBERが 1×10^{-2} を下回り、モニタした音声も途切れることなく安定した伝送を350坪級スタジオで確認でき、低遅

表8 所要受信電力の比較 (屋外実験)

変調方式	所要受信電力 (回線設計より)	所要受信電力 (測定値より)
16QAM (4br)	-87.1dBm	-85dBm -81dBm
16QAM (2br)	-72.5dBm	-80dBm -77dBm
QPSK (4br)	-93.4dBm	-84dBm -85dBm
QPSK (2br)	-78.8dBm	-86dBm -86dBm -86dBm

延デジタルラジオマイク伝送方式の有効性を確認できた。

5.6 屋外伝送実験

東京都渋谷区のNHK ホール入口付近から北に向かって200 m程のケヤキ並木がある。そこでスタジオ内の伝送実験と同様に屋外における伝送実験および測定を行った。実験諸元は表3と同じだが、伝送モードを標準マイクまたは高耐干渉マイク、送信出力を12.5 mWまたは50 mW、受信ブランチ数を2または4として組合せて9回の実験を行った。

受信電力に対するビタビ復号前のBERの測定結果から、ビタビ復号前のBERが 1×10^{-2} を上回る最大の受信電力を抽出した。また、図3-1、図3-2から1 br受信の所要CNRから、表2記載の受信機熱雑音を差し引き、フェージングマージンを加算した、所要受信電力を算出した結果を表8に示す。16QAM、QPSKの2 br受信では、回線設計より求めた所要受信電力よりも、測定による所要受信電力の方が低い値となっている。回線設計で見込んでいたフェージングマージンほど劣化していない伝搬路であると言える。しかし、4 br受信では、16QAM、QPSKともに、測定値から求めた所要受信電力の方が高くなっている。これは、4 br受信による特性改善の効果が得られていないためと思われる。回線設計のフェージングマージン値にするには、受信アンテナのブランチ間相関が低くなるように配置するなどの工夫が必要と考えられる。

伝送実験の結果は、いずれの伝送モードも、伝送距離100 mを歩行速度で移動して、音声を途切れずに伝送でき、屋外使用でも低遅延デジタルラジオマイクの有効性を示すことができた。

5.7 遅延プロファイル測定実験

ラジオマイクの特徴な使用環境として、長遅延のマルチパスの発生が予想される大規模ホールなどがある。FPU用送信機を用いて、1.2 GHz帯における伝搬特性を、幕張メッセと横浜アリーナにて測定した。幕張メッセは、東西方向に約120 m、南北方向に約105 mとなる大ホールであり、横浜アリーナのメインアリーナは、114×78 mとなる大ホールである。幕張メッセで測定した遅延プロファイルを図11に、横浜アリーナで測定した遅延プロファイルを図12に示す。二つの遅延プロファイルともにマルチパスによる遅延の拡がり観測されている。特に幕張メッセにおいては、DURが15 dB程度のマルチパスが1 μs付近で、

図11 幕張メッセの風景と遅延プロファイル

図12 横浜アリーナの風景と遅延プロファイル

DURが25 dB程度のマルチパスが $2 \mu s$ 付近で観測されるなど、最大で $4 \mu s$ 付近までの遅延の拡がり観測された。いずれの環境においても、ガードインタバル $4.9 \mu s$ を超えるマルチパスは観測されず、低遅延型デジタルラジオマイクには、充分なガードインタバル長が付加されていることが確認できた。

6. むすび

特定ラジオマイクの周波数移行が求められるなか、移行先の周波数帯で、低遅延伝送を実現するデジタルラジオマイクの伝送方式を検討・開発した。検討したパラメータを紹介し、伝送特性を計算機シミュレーションにより確認した結果、OFDMのサブキャリアごとのダイバーシティ合成受信により、良好な伝送特性となる見通しが得られた。

また、検討した伝送方式を検証するための実験装置を試作し、伝送遅延時間を測定した結果、音声非圧縮伝送のモードで $0.80 ms$ という極めて低遅延の伝送遅延時間を実現し、スタジオや屋外伝送実験でも、その有効性を示すことができた。今後、特定ラジオマイクの周波数移行に貢献できるよう、低遅延型デジタルラジオマイクの実用化に寄与していく。

最後に、本稿の実験は、平成24年度に総務省が行った『「700-900 MHz帯における周波数有効利用のための特定ラジオマイクの移行周波数における技術的条件」に関する検討』の一環として実施されたものである。また、低遅延型デジタル特定ラジオマイク伝送方式の開発にご支援ご協力頂いた関係者の方々に感謝致します。

〔文 献〕

- 1) 電波システム開発センター：“ワイヤレスマイクロホン開発部会研究開発報告書”，RCR TR-15（June 1988）
- 2) 情報通信審議会：“情報通信技術分科会小電力無線システム委員会報告”，資料61-2-2，2008年10月9日
- 3) 総務省報道資料：“「周波数再編アクションプラン」（平成23年9月改訂版）の公表”（Sep. 2011）
- 4) 濱住啓之，田口誠：“低遅延デジタルラジオマイクの開発”，映像学誌，67，10，pp.873-877（Oct. 2013）
- 5) 亀川徹，丸井淳史，阿部健彦，濱住啓之，河内博司：“演奏時における音声モニタの遅延時間の検知限とその影響について”，日本音楽知覚認知学会春季研究発表会，5，pp.25-30（2012）
- 6) "Low delay audio coding for broadcasting applications", Report ITU-R BS.2161（Nov. 2009）
- 7) "Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM) ; Wireless microphones in the 25 MHz to 3 GHz frequency range; Part 1: Technical characteristics and methods of measurement", ETSI EN 300 422-1 v1.3.2（2008-03）
- 8) 小郷直人，濱住啓之：“特定ラジオマイクの周波数移行に向けた回線設計の検討”，映像学技報，BCT2012-102，pp.1-6（Dec. 2012）
- 9) 二階堂誠也，山崎芳男：“サウンドエンジニアのためのデジタルオーディオ”，兼六館出版

田口 誠 2001年，東京工業大学大学院総合理工学研究科電子機能システム専攻修了。同年，NHK入局。長崎放送局を経て，2005年より，放送技術研究所にて，ワンセグ，地上デジタル放送の無線伝送研究に従事。現在，同所伝送システム研究部に所属。正会員。

水口 敏博 2000年，福岡大学大学院工学研究科電子工学専攻修了。同年，(株)NHKアイテック入社。主に，テレビ，ラジオスタジオの映像，音声設備およびホール，舞台などの音響設備のシステム設計に従事。

阿部 健彦 1985年，電気通信大学電気通信学部電波通信学科卒業。同年，全国朝日放送(株)(現 テレビ朝日)入社。音声制作現場を20年超経験し，ミュージックステーションなどを担当。その後音声デスクなどを経て，現在，同社制作技術センター設備担当部長として，制作現場の設備全般の管理などを担当。

濱住 啓之 1982年，福井工業高専電気工学科卒業。同年，NHK入局。津放送局を経て，1987年より，同放送技術研究所に勤務。以来，デジタル無線伝送および地上デジタル放送の送受信技術の研究に従事。同技術局を経て，現在，番組素材無線伝送技術の研究に従事。同研究所上級研究員，工学博士。正会員。