

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2019-02-0169-07

# OFDM 技术在 BPM 短波数据调制中的应用探讨\*

袁江斌<sup>1,2,3</sup>, 华宇<sup>1,2</sup>, 李实锋<sup>1,2</sup>, 闫温合<sup>1,2,3</sup>, 胡召鹏<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院 精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为了提高 BPM 短波数据服务性能,一种有效的途径是研究合理的数据调制方式。针对现有 BPM 短波授时系统的时码发播实验方案存在数据传输率低、易受干扰等问题,在不影响现有系统信号格式的基础上,提出一种可应用于 BPM 短波授时系统的高速率 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)数据调制方式。给出了一种兼容性设计方案,分析了基带 OFDM 系统模型,提出了一种基于频率分集的 OFDM 数据调制方式以抵抗短波信道的频率选择性衰落。通过理论分析与几种具有代表性的参数设计方案的仿真实验,初步验证了提出的数据调制方式的有效性,同时针对实际工程应用给出了一些有参考价值的结论与建议。

**关键词:**BPM;数据调制;正交频分复用技术;频率分集

## Discussion on the application of OFDM in BPM HF data modulation

YUAN Jiang-bin<sup>1,2,3</sup>, HUA Yu<sup>1,2</sup>, LI Shi-feng<sup>1,2</sup>, YAN Wen-he<sup>1,2,3</sup>, HU Zhao-peng<sup>1,2</sup>

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. Key Laboratory of Precise Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Studying a reasonable mode of data modulation is an effective approach to improve the performance of BPM HF data service. Aiming at the problem of low data transmission rate and easy to be interfered in existing BPM HF time service system, a new high speed OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) data modulation method which can be applied to BPM HF time transmitting system is proposed in this paper, without affecting the existing system signal format. Firstly, a compatibility design scheme is given; then, the baseband OFDM system model is analyzed, and a frequency diversity based OFDM is used to resist frequency selective fading of the shortwave channel; finally, the related parameters of the system implementation plan are calculated. Through theoretical analysis and simulation experiments of several typical parametric design schemes, the validity of the proposed data modulation method is preliminarily verified. At the same time, some valuable conclusions and recommendations are given for practical engineering applications.

**Key words:** BPM; data modulation; orthogonal frequency division multiplexing(OFDM); frequency diversity

\* 收稿日期:2018-10-15;接受日期:2018-12-13

基金项目:国防创新基金资助项目(CXJJ-16Q209);中国科学院“西部之光”人才培养计划西部青年学者 B 类基金资助项目(Y507YR6301)

作者简介:袁江斌,男,博士研究生,主要从事无线电通信与授时技术研究。

## 0 引言

作为大科学装置之一, BPM 短波授时系统是我国陆基无线电授时服务系统、国家时频体系的重要组成部分, 也是我国世界时 UT1 发播的唯一手段。目前, BPM 短波授时系统在 5 MHz 发播频点上以实验方式插播的时码信息主要包括<sup>[1]</sup>: 基本时间信息、世界时时号改正数(DUT1)、闰秒预告等, 插播方式是在 125 Hz 的副载波上发送 BCD(binary-coded decimal)码, 其中, 200 ms 长度脉冲代表“0”比特, 480 ms 长度脉冲代表“1”比特。该时码插播方案存在的主要问题: ①数据率低, 只有 1 bit/s, 发播一个完整的时码信息需要 1 min, 受到短波信道干扰的风险很大; ②时码帧格式中没有足够的预留扩展位, 难于实现系统扩展应用; ③没有可靠的校验, 接收终端难于判断接收时码信息的准确性。

提高 BPM 短波数据服务性能的一种有效途径是提高数据传输率, 进而降低受到短波信道电磁环境干扰的风险。鉴于 OFDM(orthogonal frequency diversion multiplexing)在抗符号间干扰(inter symbol interference, ISI)、多径衰落、窄带干扰等方面的独特优势以及具有高频谱利用率等优点, 本文开展 OFDM 应用于 BPM 短波授时数据调制方面的研究, 以提高系统数据传输率和降低用户接收解调误码率, 对推动我国 BPM 短波授时系统发展及功能扩展具有重要意义。

## 1 基于 OFDM 的数据调制

设计 BPM 短波授时系统新型数据调制方式应当遵循以下几个基本原则: ①不影响现体制的正常发播和现体制用户的使用<sup>[1]</sup>; ②满足 BPM 短波授时系统的带宽要求; ③满足 BPM 短波授时系统的基本数据业务需求; ④能够提高数据传输率, 具备系统扩展应用的潜力。

### 1.1 兼容性设计

为了兼容现体制, 本文提出在 UTC/UT1 时号后插入新信号体制的兼容性设计方案, 如图 1 所示。图中  $T_U$  为现 UTC/UT1 时号占用的时间, 由于 UTC/UT1 整分信号时长为 300 ms, 故设计为 300 ms;  $T_G$  为隔离时间间隔, 用于消除新信号体制对现体制用户的干扰, 设计为 100 ms;  $T_S$  为研究新型授时信号所预留的时间, 设计为 80 ms, 新型授时信号将在另文中详细研究;  $T_A$  为本文提出的新型数据调制符号占用的时间, 设计为 420 ms。

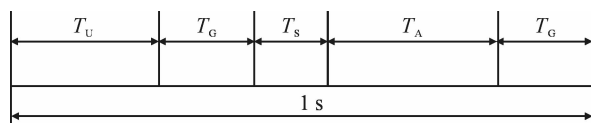


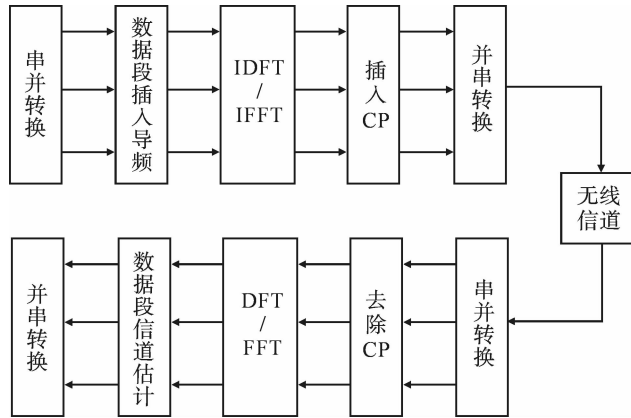
图 1 兼容性设计示意图

### 1.2 基带 OFDM 系统模型

图 2 显示了基带 OFDM 系统结构原理框图, 首先将二进制数据流作串并变换, 然后根据 MPSK(multiple phase shift keying), MQAM(multiple quadrature amplitude modulation)等调制方式映射到数据子载波上, 同时将导频插入到导频子载波上。所有子载波上的符号形成频域发射端信号向量, 经过反傅里叶变换形成时域信号向量, 然后插入循环前缀(CP)用于消除 ISI, 并作并串转换。假设系统已实现同步, 接收端对接收到含循环前缀的 OFDM 符号进行串并转换、去除循环前缀后作傅里叶变换(可用 FFT(fast Fourier transform)实现快速运算), 然后估计信道传输函数实现信道均衡用于数据解调, 最后通过并串转换得到比特数据信息。

OFDM 系统应用于时变多径信道时, 为了降低解调误码率, 信道传输函数的准确估计是接收机实现数据解调必不可少的环节。基于相干解调的 OFDM 系统中, 信道估计算法须达到一定的信道估计精度, 并具

有较低的实现复杂度,同时尽可能提高系统的传输效率<sup>[2-5]</sup>。文献[3]指出,相比于时域导频辅助信道估计算法,频域信道估计算法具有更低的实现复杂度。因此,本文采用频域插入导频的方式,辅助接收机实现信道估计。



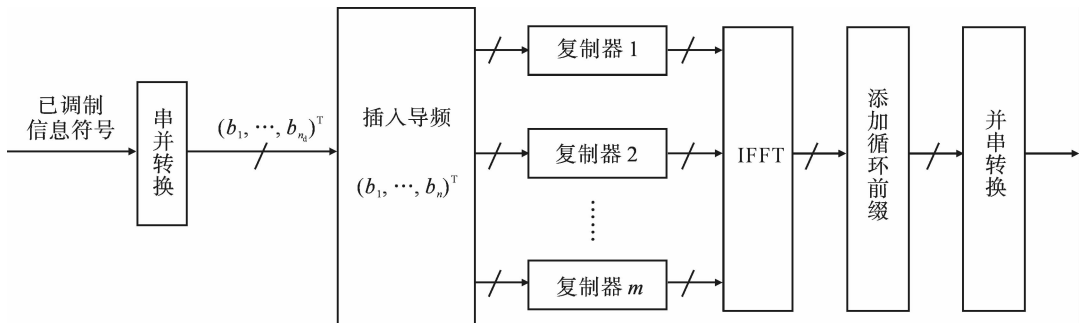
注:IDFT 为离散傅里叶逆变换,IFFT 为快速傅里叶逆变换,DFT 为离散傅里叶变换,FFT 为快速傅里叶变换,CP 为循环前缀

图 2 基带 OFDM 系统结构原理框图

### 1.3 基于频率分集的 OFDM 设计

鉴于短波信道具有频率选择性衰落特性,带宽内的有些频率成分可能会出现严重衰落的情况,为了提高数据传输的可靠性,本文采用基于频率分集的设计思路,将某一数据通过多个子载波信道进行发送,接收端可以进行分集合并接收,不仅能够有效抵抗频率选择性衰落,而且能够获得一定的信噪比处理增益。

基于频率分集的 OFDM 设计方案如图 3 所示。图中,输入的 1 帧已调的  $n_d$  个信息符号经串并转换得到并行符号  $(b_1, \dots, b_{n_d})^T$ ,插入导频后的数据信息为  $(b_1, \dots, b_n)^T$ ,然后经过  $m$  个复制器,得到  $m$  份与  $(b_1, \dots, b_n)^T$  相同的并行符号,再将复制后的符号作 IFFT(inverse fast Fourier transform),并添加循环前缀、并串转换。



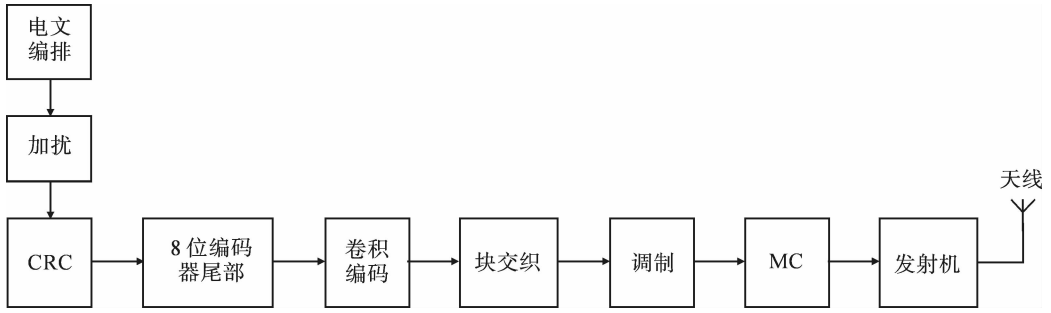
注:IFFT 为快速傅里叶逆变换

图 3 基于频率分集的 OFDM 设计示意图

### 1.4 数据调制总体实现方案

为了提高接收数据的准确性,需要引入信道编码,这里以编码方式为  $(2, 1, 9)$  卷积码为例,说明基于 OFDM 的数据调制总体实现方案,如图 4 所示。图中:加扰用于降低 OFDM 的峰值平均功率比,也能起到一定的加密作用;CRC(cyclic redundancy check)采用 8 位循环校验码;8 位编码器尾部实现卷积编码器的初始化;块交织是为了应对短波信道中的突发错误,提高卷积码的纠错效率,本文不作详细分析;MC 表示一

个完整的基于频率分集的 OFDM 符号。



注: CRC 为循环冗余校验, MC 表示一个完整的基于频率分集 OFDM 符号

图 4 基于 OFDM 的数据调制总体实现方案原理图

## 1.5 参数设计

BPM 短波授时系统主要的业务包括: ①基本时间信息(年、月、日、时、分、秒); ②辅助信息, 包括 DUT1、闰秒、闰秒提示以及用于扩展系统应用的预留信息。根据业务类型, 设计两种基本帧: 基本时间信息帧、辅助信息帧。两种基本帧的总比特数一致, 均由 8 比特的 CRC 校验码和不少于 32 比特的有效信息组成, 当采用卷积码时还需要预留 8 比特的拖尾码。因此, 基本帧的总比特数不得小于 40(不含卷积码)或 48(含卷积码)。

本文将每个 OFDM 符号所传输的数据表示为一个基本帧, 该方式不仅有利于电文的灵活编排, 而且用户解调一帧数据时, 只需要对一个 OFDM 符号进行解调, 即使解调错误, 也不会影响其他基本帧的解调结果。在参数设计之前, 首先对相关参数变量进行如下定义:  $T_A$  为 1 s 所有 OFDM 符号所占总时长的上限值(单位: ms), 取值见 1.1 节;  $B$  为系统可用总带宽(单位: Hz), 本文取 8 kHz;  $M$  为调制进制数;  $\tau_{\max}$  为最大多径时延, 本文取 1.5 ms;  $T_{CM}$  为 OFDM 有效周期长度(不含循环前缀, 单位: ms);  $T_{CP}$  为循环前缀长度, 一般为  $\tau_{\max}$  的 2~4 倍, 本文取 3 ms;  $N$  为子载波个数(不含循环前缀);  $m$  为频率分集数, 即同一信息采用  $m$  个子载波同时发送;  $\Delta f$  为子载波间隔(单位: Hz);  $\Delta f_{\min}^m$  为频率分集的最小频率间隔(单位: Hz);  $n$  为频率分集内子载波个数(含导频);  $n_d$  为频率分集内有效子载波个数(不含导频);  $G$  为由频率分集引入的高斯噪声处理增益(单位: dB);  $X$  为 1 s 内可传输的 OFDM 符号个数;  $R_B$  为有效数据率(单位: bit/s);  $R_{CB}$  为含纠错码时的有效数据率(单位: bit/s);  $I_\Delta$  为频域导频符号间隔。

结合图 4, 可以得到以上各参数之间的约束关系, 表示如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta f = B/N \\ T_{CM} = 1/\Delta f \\ n = N/m \\ n_d = [(n-1)/I_\Delta + 1]_{\text{int}} \\ \Delta f_{\min}^m = n \cdot \Delta f \\ G = 10\log_{10} m \\ T_{CP} = 2\tau_{\max} \\ X = [T_A/(T_{CM} + T_{CP})]_{\text{int}} \\ R_B = X \cdot (n_d \cdot \log_2 M - 8) \\ R_{PC} = [R_B/2 - 12X]_{\text{int}} \end{array} \right. , \quad (1)$$

式(1)中,  $[\cdot]_{\text{int}}$  表示向下取整。一般情况下, 为了适应信道的变化, 导插入必须满足二维抽样定理<sup>[6]</sup>, 就频域导频而言, 其间隔需满足:

$$I_{\Delta} \leq \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\Delta f \cdot \tau_{\max}} \right), \quad (2)$$

式(2)表明,随着  $\Delta f$  和  $\tau_{\max}$  的增加,要求的导频间隔越小。为了降低多普勒扩展和相位噪声对数据解调造成的影响,要求  $\Delta f$  越大越好,此时要求的导频间隔很小,将直接影响 OFDM 的频谱利用率,进而降低有效数据传输率。为此,本文参照文献[7]提出的信道估计性能与导频间隔相关性小、实现复杂度低的频域信道估计方法,将频域导频间隔设置为固定值,有利于提高当子载波间隔很大时的数据传输率。

调制方式取 8 PSK,导频间隔取 5,通过设定子载波总数  $N$  和频率分集数  $m$ ,根据式(1),可以计算得到上述各参数的具体值,从中挑选几种具有代表性的参数设计方案,用于本文的后续性能分析,如表 1 所示。本文将在第 2 节结合仿真结果分析讨论如何选择最佳参数设计方案。

表 1 各实现方案参数值

方案序号	$N$	$\Delta f$	$T_{\text{CM}}$	$X$	$m$	$\Delta f_{\min}^m$	$G$	$R_B$	$R_{\text{PC}}$	有无卷积码
1	1 024	7.182 5	128	3	1	—	—	7 347	—	无
2	1 024	7.182 5	128	3	1	—	—	—	3 637	有
3	1 024	7.182 5	128	3	8	1 000	9	894	—	无
4	1 024	7.182 5	128	3	8	1 000	9	—	411	有
5	256	31.25	32	11	1	—	—	6 644	—	无
6	256	31.25	32	11	1	—	—	—	3 190	有
7	256	31.25	32	11	4	2 000	6	1 595	—	无
8	256	31.25	32	11	4	2 000	6	—	665	有

## 2 仿真结果与分析

本节主要围绕是否采用频率分集、是否使用信道编码(卷积码)以及子载波数等直接影响系统有效数据传输率的因素,结合误比特率性能仿真结果,分析最佳参数的选取方法。考虑到短波信道是一个典型的时变多径信道,单纯的高斯信道下的仿真没有太大的参考价值,故这里针对多径信道+高斯信道进行仿真。仿真时,使用 Matlab 软件自带的 awgn 函数仿真模拟高斯信道以及 rayleighchan 函数仿真模拟短波时变多径信道,多普勒扩展取 0.1 Hz,按文献[8]设置多径参数:多径时延设置为 0,10,35,120,150,200 和 500  $\mu\text{s}$ ,对应的平均功率设置为 0, -1, -1, -3, -3, -4 和 -8 dB;每种信噪比下仿真 10 000 个 OFDM 符号。

仿真结果如图 5 至图 8 所示。每个仿真图中包括两种方案的误比特率性能仿真结果,其中序号小的方案没有采用频率分集,序号大的方案采用了频率分集。结果表明采用频率分集能够明显改善数据传输的误比特率性能,验证了本文提出的基于频率分集的 OFDM 系统的有效性。从图 5 和 6 可以看出,当子载波数为 1 024 时,采用卷积码对改善误比特率性能的作用并不明显,这主要是由于当子载波数很大时,OFDM 符号比较长,导致调制符号受时间选择性衰落比较严重,加之一个调制符号传输的数据量比较大,发生突发错误的概率比较高,进而降低了卷积码的纠错能力。另外,子载波间隔比较小时会加重多径信道下的载波间干扰(inter carrier interfere, ICI),进一步降低解调性能。从图 7 和 8 可以看出,当子载波数为 256 时,卷积码能够提高约 3 dB 的误比特率性能,但付出的代价是有效数据传输率降低近 2.4 倍。

需要指出的是,ICI 是影响 OFDM 数据解调性能的重要因素,抵抗 ICI 的有效手段是采用信道估计实现信道均衡。本文采用的信道估计算法虽然具有很高的频谱利用率和很低的实现复杂度,但其信道估计准确度性能对噪声比较敏感。就图 6 中方案 2 的仿真结果而言,当信噪比较低、未采用频率分集时(没有信噪比增益),信道估计性能比较差,加之可能存在的频率选择性衰落,故信噪比从 0 dB 增加到 9 dB 左右,误比特率变化曲线比较平坦。当信噪比大于一定值后,信道估计性能比较好,故信噪比大于 12 dB 时,误比特率曲线变化陡峭。

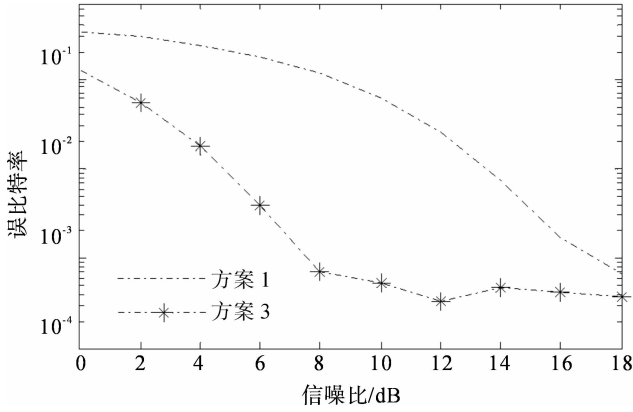


图 5 方案 1 和 3 解调仿真结果

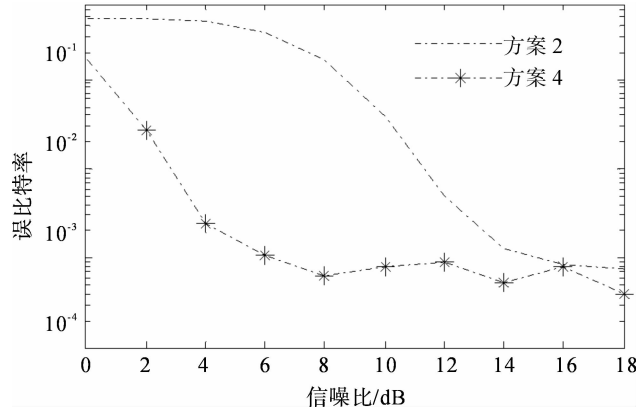


图 6 方案 2 和 4 解调仿真结果

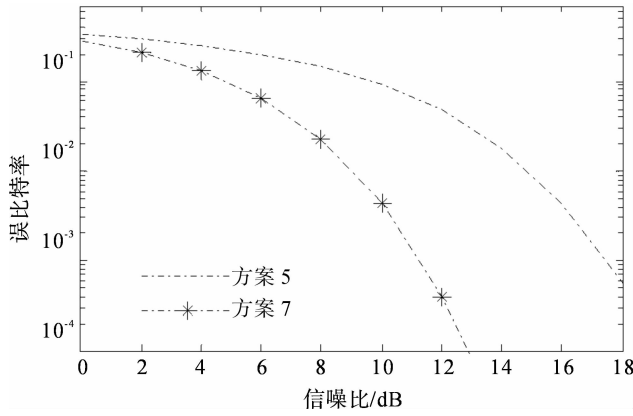


图 7 方案 5 和 7 解调仿真结果

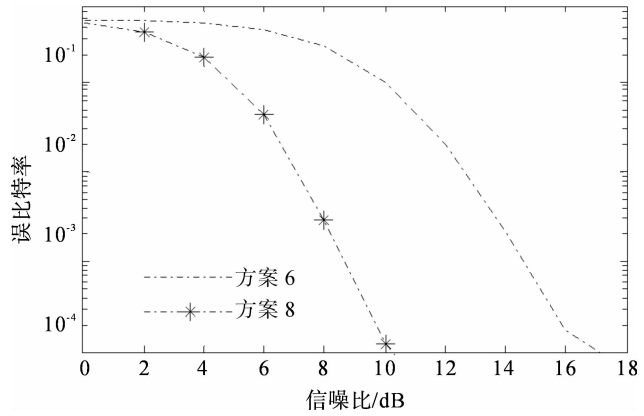


图 8 方案 6 和 8 解调仿真结果

图 9 仿真了现有 BPM 短波授时系统的数据调制方式在多径信道的误比特率性能,通过对比上述仿真结果,不难发现,采用 OFDM 数据调制方式的解调性能优于现体制的调制方式的解调性能。这是由于现体制使用时长不同的两个正弦脉冲进行数据调制,对正弦脉冲进行相关检测时,相互干扰严重,导致检测错误概率增加。另外,在多径信道中现体制的调制符号受时间选择性衰落比较严重,而且出现频率选择性衰落的风险很大,从而进一步导致检测错误概率的增加。

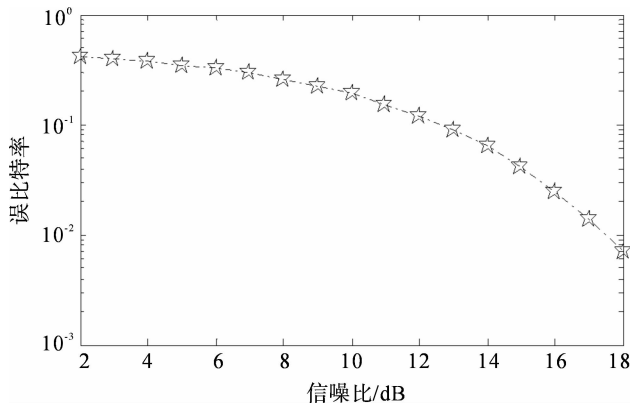


图 9 现体制调制方式的解调性能曲线

### 3 结语

BPM短波授时系统是陆基授时系统的重要组成部分,具有作用距离远以及拥有战时顽存性等优点<sup>[9-10]</sup>,扩展BPM短波授时功能和提升BPM短波授时服务性能十分必要。本文针对当前BPM短波授时系统数据服务性能差的问题,在充分考虑到短波信道特点的基础上,将传统OFDM系统模型进行了改进,提出基于频率分集的OFDM用于高速率数据调制,降低频率选择性衰落对数据解调造成的影响。通过对几种典型设计方案的仿真,初步验证了本文提出的数据调制方式的有效性。

结合仿真分析,实际工程应用中实现最佳方案设计,需要综合考虑以下几点:

①为了降低时间选择性衰落,OFDM符号不宜过长;

②为了降低多普勒频移和相位噪声的影响,子载波间隔不宜过小;

③为了提高抗频率选择性衰落和高斯噪声处理增益,频率分集中的最小频率间隔越大越好;

④增加子载波数可以缓解高斯处理增益和频率分集之间的矛盾,但会增加峰值平均功率比,进而降低发射功放的功率利用率;

⑤相位调制方式选择。在MPSK中,M越大解调性能越差;MQAM调制不是等能量调制,M越大引起的峰值平均功率比越大。当采用低进制调制方式时,如BPSK,可以适当减小频率分集数,达到在解调性能与数据传输率之间的平衡;

⑥需要在误比特率与最低数据率要求之间衡量是否需要信道纠错编码。

### 参考文献:

- [1] 蒙智谋. BPM短波时码授时发射技术方案[J]. 时间频率学报, 2014, 37(3): 145-150.
- [2] TOMASONI A, BELLINI S, FERRARI M, et al. Efficient OFDM channel estimation via an information criterion[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(3): 1352-1362.
- [3] 王建新, 周鹏, 花汉兵. OFDM系统中一种新的导频辅助信道估计算法[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(11): 1805-1811.
- [4] QI C H, YUE G S, WU L N, et al. Pilot design schemes for sparse channel estimation in OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 64(4): 1493-1505.
- [5] KONG D J, QU D M, JIANG T. Time domain channel estimation for OQAM-OFDM systems: algorithms and performance Bounds[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(2): 322-330.
- [6] 贾敏. OFDM通信系统的信道估计及多址技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [7] YUAN J B, HUA Y, YAN W H, et al. Novel algorithm of channel estimation for CP-OFDM systems with pilot symbols in frequency domain[J]. IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2017: 448-452.
- [8] 夏斌, 黄河, 瞿卫忠. 短波电离层信道的Watterson模型仿真性能分析[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(2): 207-210.
- [9] 宁百齐, 吴振华, 李钧. 电离层信道的时变特性对短波授时的影响[J]. 电波科学学报, 1994, 9(2): 78-84.
- [10] 姚富强, 刘忠英, 赵杭生. 短波电磁环境问题研究——对认知无线电等通信技术再认识[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(2): 156-161.