

MIL-STD-188-110C 波形在宽带 ITS 信道传输的性能研究

武文斌 宋爱民 高 梅 屠文超

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘 要 介绍了最新颁布的宽带短波波形标准 MIL-STD-188-110C,研究了短波 ITS 宽带信道模型的结构及其冲击响应函数的计算方法,对 24kHz 带宽波形在 Watterson 信道和 ITS 信道中传输的误码率曲线进行了仿真和比较分析,从而为研究宽带短波通信提供了一定的理论基础。

关键词 MIL-STD-188-110C,短波波形,ITS 信道

中图法分类号 TN911.7 **文献标识码** B

Investigating in the Performance of MIL-STD-188-110C HF Waveforms Transmitting in ITS Wideband HF Channel

WU Wen-bin SONG Ai-min GAO Mei TU Wen-chao

(The Telecommunication Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract The HF waveforms which are defined by the US MIL-STD-188-110C were introduced, also the model structure and the channel impulse response calculation method of the ITS wideband HF channel. This paper simulated and compared the results of the bit error rate curves of wideband waveforms transmitting in Watterson channel and ITS wideband HF channel for the first time, providing theoretic foundation in some degree on HF wideband communication research.

Keywords MIL-STD-188-110C, HF waveforms, ITS channel

随着电子技术的发展和人们对短波信道特性的进一步研究和掌握,短波正向着高速率、宽带的方向发展,美国国防部于 2011 年正式颁布了新一代的短波波形标准 MIL-STD-188-110C(简称 110C),定义了最大带宽为 24kHz、最高速率达 120kbps 的宽带调制波形,为短波通信全面进入宽带通信时代打下了基础^[1]。目前,对 110C 标准的波形性能测试是在 12kHz 带宽条件下采用传统的 Watterson 信道模型进行验证,但该模型是窄带信道模型,无法适用于带宽为 12kHz 以上的信号,所以本文将宽带 ITS 信道模型引入到系统中,并在 24kHz 带宽条件下对 110C 波形进行了仿真研究,从而更客

观地反映宽带波形的性能。

1 MIL-STD-188-110C 波形定义

110C 标准作为最新颁布的短波数据传输波形标准,从带宽、编码、交织和符号映射等多个角度对原有的标准进行了升级,从而获得了较高的传输速率以及可靠的传输性能。其共有 8 种带宽,以 3kHz 为间隔从 3kHz 增加至 24kHz,数据速率最高可达 120kbps。表 1 列出了 110C 定义的全部波形及其基本参数,包括数据速率和所用的调制方式。

表 1 短波宽带数据波形相关参数(单位:bps)

BW(KHz)	WID	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Walsh	2-PSK	2-PSK	2-PSK	2-PSK	2-PSK	4-PSK	8PSK	16QAM	32QAM	64QAM	64QAM	256QAM
3		75	150	300	600	1200	1600	3200	4800	6400	8000	9600	12000	16000
6		150	300	600	1200	2400	3200	6400	9600	12800	16000	19200	24000	32000
9		225	600	1200	2400	—	4800	9600	14400	19200	24000	28800	36000	45000
12		300	600	1200	2400	4800	6400	12800	19200	25600	32000	38400	48000	64000
15		375	600	1200	2400	4800	8000	16000	24000	32000	40000	48000	57600	76800
18		450	1200	2400	4800	—	9600	19200	28800	38400	48000	57600	72000	90000
21		525	600	1200	2400	4800	9600	19200	28800	38400	48000	57600	76800	115200
24		600	1200	2400	4800	9600	12800	25600	38400	51200	64000	76800	96000	120000

1.1 纠错编码和删余

110C 中纠错编码方式有两种,分别为约束长度为 7 和约束长度为 9 的卷积编码,编码效率为 1/2,以约束长度为 9 的

卷积码为例,其生成多项式为:

$$T_1 = x_8 + x_6 + x_5 + x_4 + 1 \quad (1)$$

$$T_2 = x_8 + x_7 + x_6 + x_5 + x_3 + x_1 + 1 \quad (2)$$

到稿日期:2012-02-12 返修日期:2012-07-13 本文受国家自然科学基金(60802053)资助。

武文斌(1985—),男,硕士生,主要研究方向为短波宽带通信技术,E-mail:wuwenbin19850511@163.com;宋爱民(1962—),男,副教授,主要研究方向为无线通信技术;高梅(1986—),女,博士生,主要研究方向为无线通信技术;屠文超(1988—),男,硕士生,主要研究方向为短波组网技术。

在 1/2 码率的基础上,为进一步提高系统的编码效率,110C 对编码后的数据块在进行交织之前采取了删余处理,使其具有 9/10,8/9,5/6,4/5,3/4,2/3,9/16 等编码率。以约束长度为 9、编码效率为 1/2 的卷积编码为例,为获得 3/4 编码率,110C 规定的删余矩阵如下:

$$\begin{matrix} 111 \\ 100 \end{matrix}$$

其中,111 和 100 分别对应 T_1 和 T_2 输出码流。1 表示该比特将被发送,0 表示不发送,所用卷积编码之后的码字每 3 比特中只能发送 2 比特。

对码率低于 1/2 的,采用重复的方式获得,包括 2/5,1/3,2/7,1/4,1/6,1/8,1/12 和 1/16 多种不同的系统编码率。相比直接获得低码率的编码方式,该方式减小了设备复杂度。

1.2 交织

删余后,数据块进入交织器进行重新排列,旨在最大限度地减小输入数据之间的相关性,110C 标准共定义了 4 种交织方式,其最大交织深度(Long Short)为 7.68s,短交织(Short)和中交织深度(Medium)分别为 0.48s 和 1.92s。

1.3 符号映射

110C 采用了多种基带调制方式,其中传输效率最高的为 256QAM,一个符号可以表示 8 个比特,效率最低的是 walsh 码调制,用于极低速率可靠的通信。其中 256QAM 在原有矩形星座图的基础上进行了调整,使其外围表现为接近圆形,从而减小了高阶 QAM 调制固有的峰均比。

2 ITS 模型

由于 110C 标准定义的信号带宽较之前的 3kHz 有较大的扩展,而传统的 Watterson 信道模型属于窄带信道模型,只适用于带宽在 12kHz 以下的信号,因此为了更客观地研究宽带高速率信号在短波信道所受的影响作用,以便更科学地分析波形性能,本文采用了宽带 ITS 模型作为传输信道模型,下面重点介绍 ITS 模型的结构、信道冲击响应函数和散射函数计算方法^[2,3]。

2.1 ITS 模型结构

ITS 的传输模型是由 N 条粗多径组成的,每条粗多径又可分为数量不等的细多径,用延迟线 τ 表示,其结构如图 1 所示。

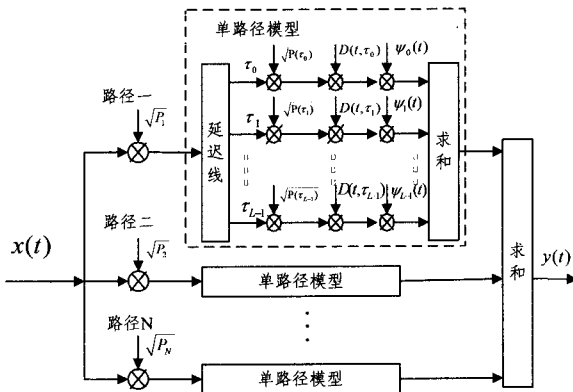


图 1 ITS 模型结构图

信道的冲击响应被定义为时间 t 和时延 τ 的函数,该时变信道冲击响应 $h(t, \tau)$ 是由多条路径的冲击响应函数 $h_n(t, \tau)$ 分别乘以各自路径的增益 $\sqrt{P_n}$,再经求和得出。 n 代表第 n 种传播路径, P_n 代表第 n 条路径的功率增益,则信道冲击响应函数表示如下:

$$h(t, \tau) = \sum_n h_n(t, \tau) \sqrt{P_n}, (n=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

式中,每个 $h_n(t, \tau)$ 的冲击响应为:

$$h_n(t, \tau) = \sum_k \sqrt{P(\tau_k)} D(t, \tau_k) \psi_k(t), \quad (k=0, 1, 2, \dots, L-1) \quad (4)$$

k 表示第 k 个时延抽头,共有 L 个。由式(2)可以看出, $h_n(t, \tau)$ 由 3 个部分构成,分别是延迟功率分布 $P(\tau)$ 、确定相位函数 $D(t, \tau)$ 、随机调制函数 $\psi_k(t)$ 。

2.2 冲击响应函数计算方法

(1)时延功率分布 $P(\tau)$

时延功率分布 $P(\tau)$ 反映了每种模式的时延功率分布情况,表达式为:

$$P(\tau) = A \exp[\alpha(\ln z + 1 - z)] \quad z = (\tau - \tau_L) / (\tau_c - \tau_L), z > 0 \quad (5)$$

式中, A 是接收信道的功率峰值, α 控制延迟功率分布的对称性, τ 是时延变量, τ_c 是功率峰值对应的时延, τ_L 是功率 $P(\tau)$ 为 0 时对应的时延,可以通过牛顿迭代法联解方程组(6)得到 τ_L :

$$\begin{cases} z_L = (\tau_L - \tau_L) / (\tau_c - \tau_L) \\ z_U = (\tau_U - \tau_L) / (\tau_c - \tau_L) \\ \ln z_U - z_U = \ln z_L - z_L \\ (1 - z_L) / (z_U - 1) = (\tau_c - \tau_L) / (\tau_U - \tau_c) < 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中, τ_L 、 τ_U 是功率 $P(\tau)$ 的门限值 A_L 所对应的时延,由 τ_L 可以计算 z_L 和 z_U 的值,并通过式(7)可求得 α 的值。

$$\alpha = \ln(S_0) / (\ln z_L + 1 - z_L), S_0 = A_L / A \quad (7)$$

(2)确定相位函数 $D(t, \tau)$

确定相位函数反映了信道的多普勒频移特性。该函数定义如下:

$$D(t, \tau) = \exp\{j2\pi[f_s + b(\tau - \tau_c)]t\}, \quad b = (f_s - f_d) / (\tau_c - \tau_L) \quad (8)$$

式中, t 是时间变量, τ 是时延变量, f_s 是 $\tau = \tau_c$ 时的多普勒频移, b 是多普勒频移随时延变量 τ 的变化率, f_d 是 $\tau = \tau_L$ 时所对应的多普勒频移。

(3)随机调制函数 $\psi_k(t)$

随机调制函数反映了信道的多普勒扩展特性。函数定义如下:

$$\psi_k(t) = \psi_{1,k}(t) + i\psi_{2,k}(t), (k=0, 1, 2, \dots, L-1) \quad (9)$$

$\psi_k(t)$ 是关于时间 t 相关而关于时延 τ 独立的复有色高斯过程,其实部 $\psi_{1,k}(t)$ 与虚部 $\psi_{2,k}(t)$ 是两个均值为 0、方差为 σ_0^2 的独立同分布高斯随机过程。 $\psi_k(t)$ 的包络服从瑞利分布,其功率谱有 Gaussian 和 Lorentz 两种形式。在仿真时,采用先产生两路独立的高斯白噪声分别作为复随机序列的实部和虚部,再经过一个窄带滤波器滤波的方法来得 $\psi_k(t)$,滤波器既可以选择 Gaussian 型,也可以选择指数型,分别对应 Gaussian 功率谱和 Lorentz 功率谱^[4]。

2.3 散射函数

信道的散射函数是描述信道特性的最重要的数学模型,它与时间延迟、时延扩展、多普勒频移以及多普勒扩展有关,是一种用图形描述接收信号的能量分布的方法。文献[4]给出了不同多普勒功率谱的 ITS 信道模型散射函数表达式。

高斯型:

$$S_G(\tau, f_P) = P(\tau) / \exp\{-\pi[f_P - f_s - b(\tau - \tau_c)]^2 / \sigma_f^2\} \quad (10)$$

$$\text{洛伦兹型: } S_L(\tau, f_P) = P(\tau) \frac{\sigma_f}{\sigma_f + i2\pi[f_P - f_s - b(\tau - \tau_c)]} \quad (11)$$

式中, σ_f 是多普勒扩展半带宽 σ_D 的函数。

$$\text{高斯型: } \sigma_f = \sigma_D \sqrt{\frac{\pi}{(-\ln S_v)}} \quad (12)$$

$$\text{洛伦兹型: } \sigma_f = \frac{2\pi\sigma_D S_v}{\sqrt{1 - S_v^2}} \quad (13)$$

而传统的 Watterson 模型忽略了模式内的时延扩展, 所以其散射函数只有在频率轴上的边际函数, 即多普勒扩展功率谱, 而且 Watterson 模型的多普勒扩展功率谱只有高斯型。文献[5]给出了其多普勒扩展功率谱分布表达式:

$$S_i(f_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(f_p - f_s)^2}{2\sigma_f^2}\right] \quad (14)$$

式中, $S_i(f_p)$ 表示第 i 个时延抽头的多普勒扩展功率谱。

下面用文献[5]给出的 80km 极地短波信道参数对两种模型的散射函数进行仿真, 具体参数见表 2, 并将仿真结果与实测图进行对比, 如图 2—图 4 所示。

表 2 80km 极地短波信道实测参数表

参数名称	O 模式	X 模式
A	1.0	1.0
S_v	0.1	0.1
f_{sL}	0Hz	0.1Hz
f_s	-0.1Hz	-0.1Hz
τ_L	296us	0us
τ_c	406us	56us
τ_U	516us	80us
σ_D	0.3Hz	0.25Hz

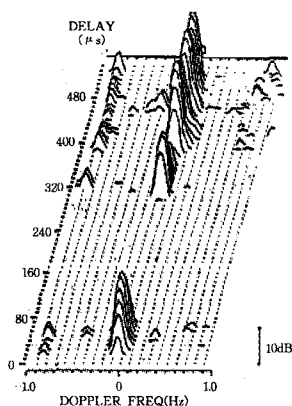


图 2 80km 极地短波信道实测函数图

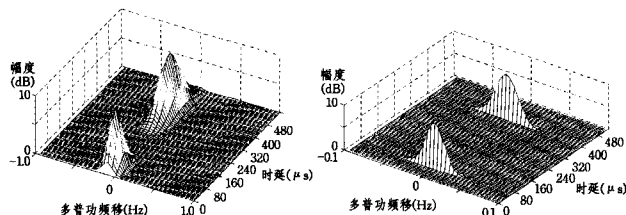


图 3 80km 极地短波 ITS 模型散射函数仿真图 图 4 80km 极地短波 Watterson 模型散射函数仿真图

图 2 为实测的散射函数图, 图 3、图 4 分别为采用 ITS 信道模型和 Watterson 信道模型得出的散射函数图, 经过与图 2 对比, 可以看出 ITS 模型与实测图两者非常接近, 而 Watter-

son 模型因为没有考虑模式内时延扩展, 所以只在两个固定时延上有多普勒扩展, 通过比较, 说明 ITS 信道能较准确地反映短波信道的传输特性。

3 宽带波形的仿真测试

仿真条件: 采用波形 5 在 12kHz、24kHz 带宽条件下进行仿真, 调制方式为 BPSK, 符号速率为 9600sym/s 和 19200 sym/s, 卷积编码约束长度为 7, 交织方式为长交织, 信道采用 ITS 模型和 Watterson 模型, 其中 ITS 模型参照表 2 的参数, 时延间隔采用符号间隔。对应的 Watterson 模型有两条多径, 其时延间隔为 6, 多普勒扩展分别为 0.3Hz 和 0.25Hz。

图 5 和图 6 分别是波形 5 在 12kHz 和 24kHz 条件下的误码率曲线, 在接收端采用了均衡与译码相结合的 Turbo 均衡技术。本文主要研究宽带波形在不同信道下的误码率性能, 不详细介绍 Turbo 均衡算法, 具体算法可参照文献[6]中的 MMSE-Turbo 均衡, 其中均衡器采用的线性滤波器长度为 20, 迭代次数为 4。从图 5 可以看出, 当信号带宽为 12kHz 时, 采用 Watterson 模型的误码率性能比采用 ITS 模型的误码率性能平均高出 0.5dB 左右, 而图 6 反映出在 24kHz 时, 两者之间的差距扩大至 2~3dB, 这表明在 12kHz 时 Watterson 模型也能体现出短波信道对信号的影响作用, 但在 24kHz 时, 采用 Watterson 模型已经不准确, 而 ITS 模型才能更客观地表示反映信道特征。

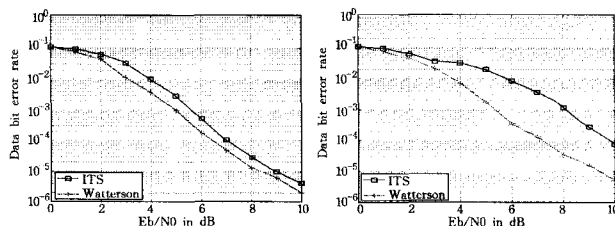


图 5 12kHz 波形 5 误码率曲线 图 6 24kHz 波形 5 误码率曲线

结束语 本文对传统的短波窄带 Watterson 信道模型和宽带 ITS 信道模型的散射函数进行了仿真, 通过比较验证了 ITS 模型能更好地反映短波信道特征, 并用 110C 宽带波形标准定义的波形 5 在两种信道模型下对误码率曲线进行了仿真, 通过仿真可以得出当信号带宽为 24kHz 时两种模型的误码率相差较大, 说明在该带宽条件下采用 ITS 模型更科学。这一结论可为研究短波宽带通信构建系统信道模型提供理论依据。

参考文献

- [1] MIL-STD-188-110C: Interoperability and Performance Standard for Data Modems [S]. September 2011
- [2] 刘强. 短波宽带信道模拟器研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007
- [3] 郭扬. 短波信道建模及扩频-OFDM 技术研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2009
- [4] 刘洋. 短波信道建模与仿真技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009
- [5] Wagner L S, Goldstein J. A Response of the high latitude HF skywave channel to an isolated magnetic disturbance[C]// HF Radio Systems and Techniques, 1991. Fifth International Conference on. 1991: 233-237
- [6] 李惠惠. 短波数据传输中的 Turbo 均衡技术研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2011