

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.01.005

利用虚载波技术抑制舱内超宽带信号对 第二代“北斗”卫星信号的干扰^{*}

吴 庆^{**},王 彤,赵长啸

(北京航空航天大学 电子信息工程学院,北京 100191)

摘 要:抑制超宽带信号对第二代“北斗”卫星信号的干扰,是实现超宽带无线通信系统在机舱环境中应用的前提之一。将虚载波技术应用到超宽带信号中,缩短了舱内超宽带信号发射机和“北斗”卫星导航接收机之间的安全距离,满足了机舱物理空间尺寸限制。在超宽带信号发射功率不变的情况下,利用超宽带信号舱内传播模型,计算了满足“北斗”卫星导航接收机门限接收信干比条件下采用虚载波技术前后的安全距离。理论计算结果显示,虚载波技术将安全距离从48 m减少到1.8 m,仍然能够满足“北斗”卫星导航接收机误码率要求。建立了系统仿真模型,仿真了误码率与安全距离的关系,仿真结果与理论计算结果一致。该方法对舱内超宽带信号干扰有抑制效果,在机舱超宽带无线通信环境中具有可行性和实用性。

关键词:机舱;超宽带;信号干扰;虚载波;第二代“北斗”卫星;多频带正交频分复用
中图分类号:TN911.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)01-0022-06

UWB Signal Interference Suppression Method for 2G Beidou Navigation Satellite System Based on Virtual Subcarriers

WU Qing, WANG Tong, ZHAO Chang-xiao

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Interference suppression for the 2G Beidou navigation satellite signal is the premise of ultra-wideband (UWB) wireless communication applications in airborne environment. Based on the virtual subcarriers in UWB signal, the safe distance between Beidou navigation satellite receiver and UWB transmitter is reduced to eliminate the cabin size limitation. With the Beidou navigation satellite receiver's signal-to-signal ratio (SNR) threshold and the UWB transmitter's total transmission power, the safe distance is calculated before and after using virtual subcarriers according to the UWB channel characteristics in cabin. The safe distances is reduced from 48 m to 1.8 m while the bit error rate (BER) performance of Beidou navigation satellite system receiver is guaranteed at this distance. The theoretical result is verified in Matlab Simulink. It is shown that virtual subcarriers are effective to reduce the interference of UWB signal on the Beidou navigation satellite system signal. They are feasible and practical in UWB wireless communication environment in cabin.

Key words: aircraft cabins; ultra-wideband (UWB); signal interference; virtual subcarrier; 2G Beidou satellite; MB-OFDM

1 引 言

由于超宽带(Ultra-Wideband, UWB)信号具有大

带宽、低功率、抗干扰、低截获的优势,人们开始设想在航空器上使用超宽带无线通信系统取代总线进行数据传输,以增加数据传输带宽,提高飞机有效载

^{*} 收稿日期:2012-06-27;修回日期:2012-08-16 Received date:2012-06-27;Revised date:2012-08-16
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60879024)
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No.60879024)
^{**} 通讯作者:buaaer@ee.buaa.edu.cn **Corresponding author:** buaer@ee.buaa.edu.cn

荷,降低维护成本。但是,超宽带信号占用了大量且连续的无线信号频段,当这些频段与其他机载无线设备信号工作频段无法避免地重叠时,超宽带信号将成为主要干扰信号进入其他机载无线接收设备后端,降低设备工作性能。为了能让超宽带无线通信设备与其他机载无线设备共存,首先需要保证超宽带信号不会对已有的机载无线设备(如卫星导航信号接收机等)的工作性能造成影响。目前广泛研究的是超宽带无线信号对 GPS 卫星导航定位系统接收机的影响^[1-4],很少有超宽带信号对“北斗”卫星导航信号干扰的相关研究。

超宽带信号对于第二代“北斗”卫星导航信号而言是噪声信号,为了保证“北斗”卫星导航接收机正常工作,可以采取以下两种方法来保证“北斗”卫星导航接收信号的信噪比:一是降低超宽带信号的发射总功率,二是增加超宽带信号发射机与“北斗”卫星导航接收机之间的距离。但是,前者是以降低超宽带无线通信距离为代价,后者虽然保证了超宽带无线通信距离,但受到机舱物理空间尺寸的限制。

本文在超宽带信号中利用虚载波技术,抑制超宽带信号对舱内第二代“北斗”卫星导航接收机接收信号的干扰。在超宽带无线信号所使用的频带内,为“北斗”卫星导航信号让出足够的带宽,让出的频带内超宽带信号发射功率要远低于超宽带信号频带内其他频点的发射功率,提高了“北斗”卫星导航接收信号的信干比,保证“北斗”卫星导航接收机载波恢复环路的工作性能。理论计算和仿真实验证明,在保证“北斗”卫星导航接收机误码率和超宽带信号发射功率不变的前提下,此方法减小了超宽带设备对“北斗”卫星导航接收机的安全距离,解决了安全距离受机舱物理空间尺寸限制的问题。

2 超宽带信号模型及虚载波技术

超宽带信号的实现方式主要有两种:单脉冲超宽带(Impulse Radio Ultra-WideBand, IR-UWB)和多频带正交频分复用(Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing, MB-OFDM)。相对于 IR-UWB, MB-OFDM 采用多频带子载波方式,可以对特定频段进行灵活配置,达到设置虚载波的目的。本文研究的超宽带信号即为 MB-OFDM 实现方式。

2.1 MB-OFDM 信号模型

MB-OFDM 方案将整个规定的可用频段(3.1 ~ 10.6 GHz)划分为 14 个子频带,每个子频带的带宽为 528 MHz,每个子频带都分别使用 OFDM 技术传输

信息。传统的 OFDM 信号可以描述为^[5]

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} d_i \text{rect}(t - t_s - \frac{t}{2}) \exp(j2\pi f_i(t - t_s)) \quad (1)$$

式中, $t_s \leq t \leq t_s + T$, N 为子载波个数, T 为 OFDM 符号周期, d_i 为被调制数据, f_i 为第 i 个子载波的频率, $\text{rect}(t)$ 为矩形函数。

MB-OFDM 系统按照协议规定^[6]将 14 个子频带分成 6 组,每组分别包含 2~3 个子频带。系统通过跳频技术交替使用组内各个子频带,将传统的 OFDM 信号的频带进一步展宽,实际的传输信号与复基带信号之间的关系为

$$s_{\text{RF}}(t) = \text{Re}\{\sum_{n=0}^{N_B-1} s_n(t - nT) \exp(j2\pi f_i t)\} \quad (2)$$

式中, $\text{Re}(\cdot)$ 表示取实部; $s_n(t)$ 是第 n 个子频带 OFDM 符号的复基带信号,其持续时间为 $(0, T)$; N_B 是组内使用的子载波数; f_i 是第 i 个子载波的中心频率。 $s_n(t)$ 可以通过快速傅里叶反变换(IFFT)来实现。

2.2 虚载波技术

MB-OFDM 信号产生经过数据编码、打孔交织、星座映射、子载波分配、插入导频和保护间隔、IFFT、跳频调制等过程,最终超宽带信号通过天线辐射出去。在子载波分配环节中,可以通过将特定子载波上的数据设置为恒零来形成虚载波,实现对特定频率的避让。如图 1 所示,在 $N_B = 128$ 个子载波中,将第 31 至第 40 个、以及第 89 至第 98 个子载波用零来填充形成虚载波。这样,超宽带信号在相应频率 3.296 ~ 3.333 GHz 和 3.535 ~ 3.572 GHz 范围内为其他信号提供了两个约 37 MHz 带宽的通频带,超宽带信号在这个频带内有 20 dB 的衰减。利用这个原理,当超宽带信号的频带覆盖到其他有用窄带信号时,可以利用在超宽带频段中将相应子载波设置成虚载波形成通频带的方法,减少超宽带信号对其他窄带信号的干扰。

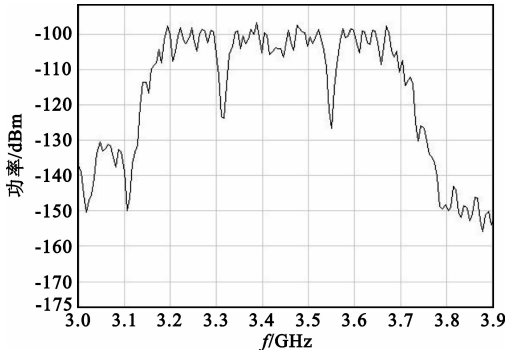


图 1 设置虚载波形成通频带
Fig.1 Passband with zero subcarriers

3 第二代“北斗”卫星导航接收系统

第二代“北斗”卫星导航系统接收机由天线模块(含低噪声放大器)、RF 模块、IF 模块、电源模块、时钟模块和测高仪组成。

在 IF 模块中,载波恢复的作用就是消除本地载波与输入载波信号的频率和相位偏差。这种频率和相位的偏差是由多普勒效应和频率源晶振的偏差引起的。通过载波锁相环可提取和输入信号相干的载波,达到相干解调的目的。基本原理如图 2 所示,输入的中频信号与本地载波相乘,经过低通滤波器滤除高频分量后,得到的基带信号与 PN 码跟踪模块输出的 PN 码相乘,完成解扩运算,I 通道输出为调制信息。I 通道数据以一个符号码元为时间单位进行积分后,输出到维特比译码模块。

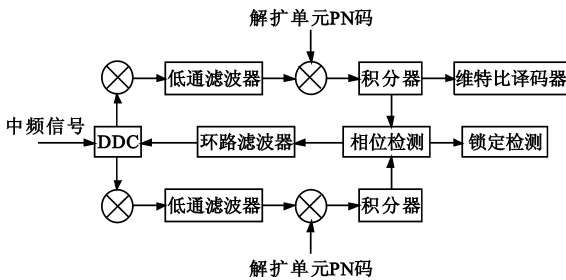


图 2 “北斗”卫星导航接收机载波恢复电路
Fig.2 Carrier recovery loop of Beidou navigation satellite receiver

系统输入的是载波频率为 12 MHz、调制码速率 4.08 Mb/s 的 BPSK 信号

$$X(t) = D(t)PN(t)\cos[(\omega_c + \omega_{\text{dop}})t + \varphi] \quad (3)$$

式中, $D(t)$ 为调制数据, ω_c 为载波频率, ω_{dop} 为多普勒频率。经量化后得

$$X(n) = D(n)PN(n)\cos[(\Omega_c + \Omega_{\text{dop}})n + \varphi] \quad (4)$$

其中, $\Omega = w_{Ts}$, T_s 为采样周期。令总相位偏差 θ_e 为 $\Omega_{\text{dop}}n + \phi$, 设本地载波信号为 $\cos(\Omega_c n)$ 和 $\sin(\Omega_c n)$, 经乘法器得

$$SI(n) = x(n)\cos(\Omega_c n) = \frac{1}{2}D(n)PN(n)[\cos(2\Omega_c n + \theta_e) + \cos\theta_e] \quad (5)$$

$$SQ(n) = x(n)\sin(\Omega_c n) = \frac{1}{2}D(n)PN(n)[\sin(2\Omega_c n + \theta_e) - \sin\theta_e] \quad (6)$$

经低通滤波器滤除倍频分量和解扩后得到

$$I(n) = \frac{1}{2}D(n)\cos\theta_e \quad (7)$$

$$Q(n) = -\frac{1}{2}D(n)\sin\theta_e \quad (8)$$

由

$$\theta_e = \arctan\left(-\frac{Q(n)}{I(n)}\right) \quad (9)$$

可求得相位误差,经环路滤波器滤波,即可得到 NCO 的控制信号,校正本地载波,使其锁定到输入信号载波上。

4 超宽带信号抑制及安全距离

在特定情况下,超宽带信号会对在同一频段内的其他窄带信号造成干扰。为了研究“北斗”卫星导航接收机载波恢复环路在超宽带信号干扰下的误码率性能,将超宽带信号频率覆盖到“北斗”卫星导航信号频率 2 483.5 ~ 2 500 MHz 范围内,即设置超宽带信号频率范围为 1.82 ~ 3.40 GHz。“北斗”卫星导航接收天线接收到的信号 $s(t)$ 包含了“北斗”卫星导航信号 $s_{\text{BD}}(t)$ 、超宽带信号 $s_{\text{UWB}}(t)$ 和其他噪声信号 $n(t)$:

$$s(t) = s_{\text{BD}}(t) + s_{\text{UWB}}(t) + n(t) \quad (10)$$

接收信号 $s(t)$ 经过滤波和两级下变频,通过模数转换器采样后进入 IF 模块。

当存在超宽带信号干扰时,“北斗”卫星导航信号等效载波功率与噪声单边功率谱密度之比可以表示为^[7]

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{eq}} = \frac{C}{N_0 + \frac{J}{2R_C}} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)^{-1} + \frac{J/C}{2R_C}} \quad (11)$$

式中, C 、 N_0 、 J 、 R_C 分别表示载波功率、噪声单边功率谱密度、干扰功率、码速率。“北斗”卫星导航接收机的干扰容限是接收信噪比 $(C/N_0)_{\text{eq}}$ 降低到 $(C/N_0)_{\text{th}}$, 即保证接收机载波跟踪环锁定到要求的最低信噪比。则干扰容限为

$$M_{J1\text{dB}} = 10\lg[2R_C((C/N_0)_{\text{th}}^{-1} - (C/N_0)^{-1})] \quad (12)$$

干扰容限的最大值满足

$$M_{J1\text{dB}} < 10\lg[2R_C(C/N_0)_{\text{th}}^{-1}] = (2R_C)_{\text{dB}} - (C/N_0)_{\text{th}/\text{dB}} < (2G_P)_{\text{dB}} - (E_b/N_0)_{\text{th}/\text{dB}} \quad (13)$$

式中, $G_P = R_c/R_b$ 为处理增益。“北斗”卫星导航接收机接收信号误码率为 10^{-5} , 则接收的 E_b/N_0 不小于 7 dB。“北斗”卫星导航信号的测距码速率和信息比特率分别为 4.08 Mchip/s 和 8 kb/s, 则 $G_P = 27$ dB, 计算可得“北斗”卫星导航接收机干扰容限上界不超过 47 dB。

定义 SSR(Signal-to-Signal Ratio)为“北斗”卫星导航接收机接收到的“北斗”卫星导航信号与超宽带信

号的功率比:

$$SSR = 10\lg \frac{P_{BD}}{P_{UWB}} = P_{BD/dBm} - P_{UWB/dBm} \quad (14)$$

则在满足干扰容限的条件下,

$$SSR \geqslant -47 - 10\lg \frac{528 \times 3}{16.5} \approx -66.8 \text{ dB} \quad (15)$$

“北斗”卫星信号的最低发射功率为76.0 dBm,经过36 000 km的自由空间传输并考虑传输过程中可能的各种损耗因素,“北斗”卫星导航接收机接收到的信号电平约为−127.6 dBm。根据“北斗”卫星导航接收机干扰容限−66.8 dB,计算得到“北斗”卫星导航接收机接收到的超宽带信号最大功率为

$$-127.6 \text{ dBm} - (-66.8 \text{ dB}) = -60.8 \text{ dBm} \quad (16)$$

根据美国联邦通信委员会的相关规定^[8],超宽带发射机在1.82~1.99 GHz、1.99~3.40 GHz频段内的信号发射功率谱密度上限分别为−53.3 dBm/MHz和−51.3 dBm/MHz,计算可得频带内超宽带信号发射总功率上限为−21.3 dBm。为了满足式(15)的干扰容限上界条件和超宽带信号最大发射功率限制,超宽带信号在自由空间的传播损耗至少为

$$-21.3 \text{ dBm} - (-60.8 \text{ dBm}) = 39.5 \text{ dB} \quad (17)$$

超宽带自由空间传播损耗 PL 与传播路径 d 的关系可以用下式表示^[9]

$$PL(d)_{dB} = PL_0 + 10n\lg \frac{d}{d_0} + X_\sigma \quad (18)$$

式中,PL₀表示在距离 d₀(通常是1 m)下的归一化路径损耗,n 是传播损耗系数,X_σ表示大尺度衰落带来的随机变化量,通常认为符合正态分布。

根据文献[10~11]得到的机舱环境下传播损耗系数和大尺度衰落变量,由式(17)~(18)可以计算出在机舱内部超宽带发射机对“北斗”卫星导航接收机的安全距离 d 为48 m。

若采用2.2节所描述的设置虚载波避让的方

法,假设“北斗”卫星导航信号包含在超宽带信号频带中,且“北斗”卫星导航信号频率在超宽带信号虚载波形成的通频带处,则满足“北斗”卫星导航接收信号干扰容限的 SSR 值为−101.2 dB,即“北斗”卫星导航接收机接收到的超宽带信号最大功率为

$$-127.6 \text{ dBm} - (-101.2 \text{ dB}) = -26.4 \text{ dBm} \quad (19)$$

由式(17)的结果可以计算出超宽带信号路径损耗不小于5.1 dB即可满足干扰容限要求,由式(18)可得相应的传播距离(即安全距离)为1.8 m,远小于未利用虚载波技术时所需要的安全距离48 m,能够在机舱物理空间尺寸限制下实现设备布局。

5 仿真模型与仿真结果

通过 MATLAB Simulink 建立如图3所示仿真模型,包括“北斗”卫星导航信号源、超宽带信号源(信号发射机和传输信道)、RF 接收模块(下变频和滤波)、“北斗”卫星导航信号载波恢复模块等。超宽带信号源基带采用5/8码率的卷积编码,交织包括块内交织和块间交织,调制方式为初始相移 π/4 的 QPSK,IFFT 变换点数为128点,循环前缀为37点,跳频方式采用 TFCI^[5],3个载波频率分别为2 080.32 MHz、2 608.32 MHz、3 136.32 MHz。MB-OFDM 超宽带信号子载波数为128,并将第32~39、90~97个子载波设置成虚载波,信道模型为舱内超宽带传输模型^[10]。超宽带信号在1.82~3.40 GHz 频率范围内,有6个带宽为33 MHz的通频带,其中避让“北斗”卫星导航接收信号的通频带频率范围是2.477~2.506 GHz。RF 接收模块包括两次下变频(本地载波频率分别为2 398 MHz和105.75 MHz)和相应滤波器。“北斗”卫星导航信号载波恢复模块包括乘法器、滤波器、鉴相器、VCO 等。仿真实验过程中,PN 码已经正确捕获同步。

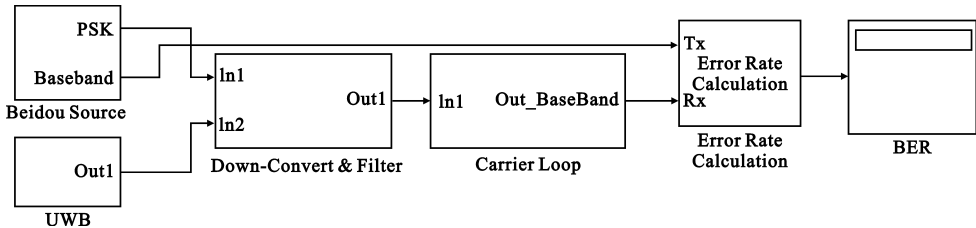


图3 通过 Simulink 建立的系统仿真模型
Fig.3 System model in Simulink

改变“北斗”卫星导航信号源和超宽带信号源输出信号的功率比,仿真得到不同信号功率比 SSR 下“北斗”卫星导航接收机的误码率,如图 4 所示。根据要求,“北斗”卫星导航接收机接收信号误码率阈值为 10^{-5} ,由仿真结果可知,当 $SSR \geq -98$ dB时,即可保证载波恢复电路正常工作,和第 4 节理论计算得到的满足干扰容限的 SSR 值 -101.2 dB保持一致。

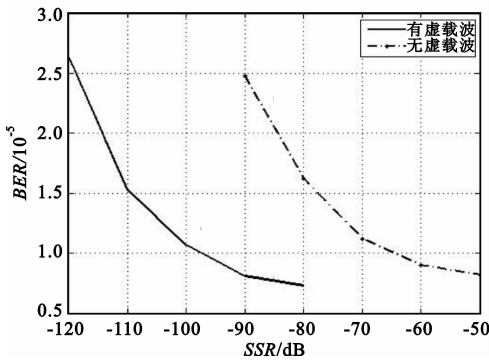


图 4 不同 SSR 下的接收信号误码率
Fig.4 BER at different SSR

保持“北斗”卫星导航信号源模块输出信号功率为 -127.6 dBm,保持超宽带信号源发射机总功率满足规定的上限发射功率 -21.3 dBm,改变超宽带信号源传输信道的传播距离参数,仿真得到“北斗”卫星导航接收机与超宽带信号发射机在不同距离下“北斗”卫星导航接收机的误码率,如图 5 所示。从图 5 可以看出,为了保证误码率小于 10^{-5} ,“北斗”卫星导航接收机与超宽带发射机之间的距离至少应为 2.2 m。若不采用虚载波方式,则需要“北斗”卫星导航接收机与超宽带发射机之间间隔约 58 m,超出了飞机的长度限制。

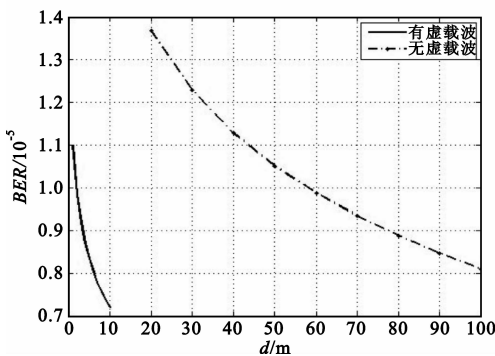


图 5 不同距离下的接收信号误码率
Fig.5 BER at different distance

由于部分用于传输数据的子载波被设置成虚载波,原本用于传输有效数据的 100 个子载波剩下 85 个(第 39 个子载波为导频子载波)。为了使原始基带数据在卷积、打孔、交织、分配子载波等过程中符合数据变换长度要求,最大理论数据传输速率从 53.3 Mb/s下降为 42.64 Mb/s。这样的数据传输速率仍大于现有的航空总线 MIL-STD-1553B 数据传输速率。

6 结 论

在信号实现方式为 MB-OFDM 的超宽带无线信号中采用虚载波技术,能有效抑制机载超宽带信号对舱内第二代“北斗”卫星导航系统的干扰,保证“北斗”卫星导航接收机的误码率要求。在超宽带信号发射功率为最大限制发射功率的情况下,经过理论计算,机载超宽带信号发射机和第二代“北斗”卫星导航接收机之间的安全距离从 48 m缩短至 1.8 m。在这个安全距离之外,“北斗”卫星导航接收机的误码率保持在 10^{-5} 以内。实验建立系统模型进行仿真,验证了与理论计算结果的一致性。

采用合理有效的信号实现方式,能够保证超宽带设备不会对同一环境中使用的其他设备造成影响。虽然设置虚载波降低了超宽带信号数据传输速率,但仍大于目前机载航空总线数据传输速率,在进一步的研究中可以寻求更高效的编码方式来补偿虚载波造成的传输速率损失。超宽带信号的干扰抑制及避让研究将逐步推进超宽带无线通信设备在机舱环境中的应用。

参考文献:

- [1] Garmatyuk D, Morton Y J, MAO Xiaolei. On co-existence of in-band UWB-OFDM and GPS signals: Tracking performance analysis [C]//Proceedings of 2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Monterey, CA: IEEE, 2008: 196 – 202.
- [2] Tian Tian, Song Qijun, Zhang Hongshun. Analysis of Time-Hopping UWB Interference Effect on GPS Receivers [C]//Proceedings of 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Hangzhou: IEEE, 2007: 1258 – 1262.
- [3] XU Yong, LU Yinghua, HE Pengfei, et al. Estimating the Interference of UWB Pulse Signal to GPS Receiver [C] //Proceedings of 2006 International Conference on ITS Telecommunications. Chengdu: ITS, 2006: 286 – 289.
- [4] Garmatyuk D, YU Morton, MAO Xiaolei. Radar and GPS Sys-

- tem Inter-Operability with UWB-OFDM Signals [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47 (1): 265 – 274.
- [5] 汪裕民. OFDM 关键技术与应用 [M]. 北京:机械工业出版社, 2007: 22.
WANG Yu-min. OFDM Key Technology and Application [M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing, 2007: 22. (in Chinese)
- [6] Heidari G. WiMedia UWB Technology of Choice for Wireless Use and Bluetooth [M]. New York: Wiley, 2008: 56.
- [7] 赵新曙. “北斗”卫星定位接收机抗干扰技术研究 [D]. 北京:北京航空航天大学, 2008: 20.
ZHAO Xin-shu. Research for Compass Navigation Satellite Receiver Anti-jamming [D]. Beijing: Beihang University, 2008: 20. (in Chinese)
- [8] ET Docket 98 – 153, FCC First Report and Order Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems [S].
- [9] Jacob M, Chee K L, Schmidt I, et al. Influence of Passengers on the UWB Propagation Channel within a Large Wide-Bodied Aircraft [C] // Proceedings of the 3rd European Conference on Antennas and Propagation. Berlin: IEEE, 2009: 882 – 886.
- [10] 蒋宇乐, 熊华钢, 查振羽. 机舱内部超宽带确定性信道建模 [J]. 航空学报, 2010, 31(1): 158 – 164.
JIANG Yu-le, XIONG Hua-gang, ZHA Zhen-yu. Deterministic Modeling Method for Aircraft Inside-cabin UWB Channels [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(1): 158 – 164. (in Chinese)
- [11] Jame C, Ni Xin, Huang Howard, et al. UWB Radiowave Propagation within the Passenger Cabin of a Boeing 737 – 200 Aircraft [EB/OL]. 2007 [2012 – 06 – 20]. <http://bul.ece.ubc.ca/James%20-%20UWB.pdf>.

作者简介:



吴庆 (1983—), 男, 江苏常州人, 2006 年于北京航空航天大学获电子信息工程专业学士学位, 2009 年于北方工业大学获信息工程专业硕士学位, 现为博士研究生, 主要研究方向为超宽带无线通信及信号处理、航空电子综合;

WU Qing was born in Changzhou, Jiangsu Province, in 1983. He received the B.S. degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics and the M.S. degree from North China University of Technology in 2006 and 2009, respectively. He is currently working toward the Ph.D. degree. His research interests include ultra-wideband communication and ultra-wideband signal processing.

Email: buaaer@ee.buaa.edu.cn

王彤 (1962—), 女, 研究员, 分别于 1984 年和 1987 年获北京航空航天大学计算机科学与工程专业学士学位和硕士学位, 现为研究员, 主要研究方向为航空电子综合、总线通信网络技术、电子设备智能测试;

WANG Tong was born in 1962. She received the B.S. degree and the M.S. degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 1984 and 1987, respectively. She is now a senior engineer of professor. Her research interests include avionics integration, bus communication network, electronic equipment intelligent test.

Email: tongwang@buaa.edu.cn

赵长啸 (1989—), 男, 山东临清人, 2004 年于北京航空航天大学获电子信息工程专业学士学位, 现为博士研究生, 主要研究方向为无线通信、航空数据链、实时系统调度。

ZHAO Chang-xiao was born in Linqing, Shandong Province, in 1989. He received the B.S. degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 2004. He is currently working toward the Ph.D. degree. His research interests include wireless communication, aeronautic data link, real-time systems scheduling.

Email: zhaochangxiao@yeah.net