

文章编号: 2095-4980(2013)04-0512-06

太赫兹波应用于临近空间高速飞行器测控研究

宋小全, 韦震, 韩中生, 龙方, 王禹

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 临近空间高速飞行器测控需要解决“黑障”、超视距时空连续覆盖和多目标等难题, 根据太赫兹电磁波可以穿透等离子体而大气传输损耗大的特点, 研究以飞机和飞艇为主要平台的空基太赫兹测控系统, 提出采用扩频体制实现对高速飞行器进行测距、测速、遥测和遥控的综合测控以及多目标测控, 采用 $nR\dot{R}$ ($n \geq 3$) 测量体制实现高速飞行器的外弹道测量, 分析表明空基太赫兹扩频测控系统技术可行, 但离工程应用还有较大差距。

关键词: 太赫兹波; 临近空间; 高速飞行器; 扩频测控

中图分类号: TN99; V556.1

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201304.0512

Research on application of Terahertz technology to near-space hypersonic spacecraft Tracking Telemetry and Command

SONG Xiao-quan, WEI Zhen, HAN Zhong-sheng, LONG Fang, WANG Yu
(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Tracking Telemetry and Command(TT&C) for near space hypersonic spacecraft needs to solve blackout, over-the-horizon and multi-target problems. According to the characteristics that Terahertz waves can penetrate the plasma and are attenuated intensively in the atmosphere, the Terahertz TT&C system based on airborne platform including aeroplane and airship is researched. The Terahertz system can accomplish integrated function of velocity measurement, ranging, telemetry and telecommand by using spread spectrum technology; and tracking telemetry and command for multi-target can be realized as well. The ballistic measurement of hypersonic spacecraft can be implemented by using $nR\dot{R}$ ($n \geq 3$) method. The analysis results indicate that the technology solutions for air-borne Terahertz spread spectrum TT&C system are reasonable, while there are significant differences for engineering application.

Key words: Terahertz wave; near space; hypersonic spacecraft; spread spectrum Tracking Telemetry and Command

临近空间包括大气平流层、中间层和部分电离层, 介于传统的空天之间, 根据国际航空联合会的定义, 临近空间的范围为 23 km~100 km。临近空间飞行器是指在临近空间区域内飞行并完成特定任务的飞行器, 主要包括低速和高速两类飞行器。低速飞行器主要有平流层飞艇、高空气球、高高空无人机等, 主要用于预警探测、侦察监视、通信保障和电子对抗等信息支援; 高速飞行器主要有高空侦察机、高超音速飞行器、亚轨道飞行器等, 主要用于天地往返运输、反导和对地精确打击等方面^[1-2]。由于临近空间高速飞行器具有极大的战略意义和应用价值, 世界主要航空航天大国, 如美国、俄罗斯、法国和英国等积极开展相关研究工作, 美国在该领域处于领先地位, 并于 2004 年成功试飞了 X-43A 验证机, 创造了 9.8 倍音速的飞行速度, 最近 X-51A 高超声速发动机演示验证飞行器进行了 3 次试飞, 其中 1 次取得部分成功, 2 次失败。

临近空间高速飞行器测控(Tracking Telemetry and Command, TT&C)需要解决“黑障”和超视距时空连续覆盖等难题, 根据太赫兹波可以穿透等离子体而大气传输损耗大的技术特点, 本文提出以飞机和飞艇为主要平台的空基太赫兹测控系统, 研究了对临近空间高速飞行器进行跟踪、测距、测速、遥测和遥控的实现方法, 分析了空基太赫兹测控系统的技术可行性。

1 临近空间高速飞行器测控的主要难点

临近空间高速飞行器在大气中进行有动力飞行,需要进行全过程连续跟踪测量和运动学定轨。文献[3]分析了临近空间飞行器测控系统的特点和主要技术问题,归纳该文的分析结果,临近空间高速飞行器测控的主要难点包括3个方面。

1.1 黑障问题

飞行器以高超音速在临近空间中飞行时,强烈的激波压缩和粘性摩擦作用使飞行器表面温度迅速升高,极高的温度使大气分子产生离解、电离,在飞行器周围产生等离子体,同时热屏蔽覆盖物烧蚀和发动机火焰也会产生等离子体,形成复杂的等离子鞘套。在对飞行器进行测量控制时,等离子体中的高密度电子吸收、反射和散射电磁波,造成电磁波信号急剧衰减,导致飞行器与测控站之间的信号中断和雷达目标丢失,即“黑障”问题。

1.2 超视距时空连续覆盖

由于临近空间高速飞行器的飞行高度比卫星低,飞行距离较远,通常要采用地基多站接力或天基测控系统来实现超视距覆盖。一个典型的例子是美国 X-43A 高超音速临近空间飞行器的飞行试验。X-43A 飞行高度 30 km,飞行速度近 10 Ma,飞行距离达 1 600 km,在试验中,美国西部航空试验靶场、海军海上靶场以及范登堡空军基地的测控设备采用多站接力,并动用了测控飞机来完成对 X-43A 的测量和控制。

1.3 多目标测控

一些临近空间高速飞行器要用火箭和飞机推动进入临近空间,如美国的“猎鹰计划”和“X-43”系列高超音速飞行器,此外编队飞行是临近空间高速飞行器的一个重要特点和应用方式,因此通常要进行多目标测控。

2 空基太赫兹测控系统的技术特点

实现临近空间高速飞行器测控有多种方案和实现途径,从发展的角度看,采用空基太赫兹测控系统具有突出的技术优势。

2.1 解决“黑障”难题,降低太赫兹波大气传输衰减的影响

电磁波在等离子体中传输时,主要受等离子体频率的影响^[4]。通常情况下,等离子体频率 ω_p 接近等离子体内部的电子振荡频率 ω_{pe} , 即:

$$\omega_p \approx \omega_{pe} = 5.6416 \times 10^4 \sqrt{n_e} \quad (1)$$

式中 n_e 为电子密度,单位为个/cm³, n_e 与飞行器的速度、飞行器的外形(用飞行器前缘的楔角来表征)以及飞行高度(不同高度的空气密度不同)有关。由于临近空间高速飞行器周围电离层的峰值电子密度高达 10¹⁵/cm³^[3],对应的等离子体频率 ω_p 为 1.78 THz,即要求测控系统的工作频率 f 大于 283.9 GHz。目前太赫兹核心器件的工作频率在 300 GHz 以上,能穿透等离子体,可以解决临近空间高速飞行器测控中的“黑障”难题。

采用空基太赫兹测控系统的最大优势是降低太赫兹波大气传输损耗的影响。根据国内外研究和试验结果,在近地面,水汽和氧气对太赫兹波的衰减很大^[5-6],工作频率为 300 GHz 左右的太赫兹波每 km 传输损耗高达几个 dB,随着工作频率的提高,衰减系数迅速增大。而在海拔 10 km 以上,太赫兹波的大气传输损耗基本上可忽略不计。

2.2 可实现长距离连续覆盖,减轻多站接力压力

测控站对飞行目标进行跟踪测量时,其视距范围的近似计算公式^[7](仅考虑地球曲率)为:

$$R_L = 3.57\sqrt{R}(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}) \quad (2)$$

式中: R_L 为测控站视距,单位为 km; R 为等效地球半径系数,取值 1.334; H_1 和 H_2 分别为测控站和目标的高度,单位为 m。

对于高度为 30 km 的飞行器,地面测控站视距为 710 km;采用高度为 10 km 的机载测控站,视距为 1 120 km;而采用高度为 30 km 的艇载测控站,视距为 1 420 km。

因此,采用机载或艇载空基测控站,测控系统受视距限制小,可实现长距离连续覆盖,减少远距离测控的接力要求。

2.3 保密性好,抗干扰能力强

由于大气传输损耗的影响,地面侦察干扰设备很难截获太赫兹频段的测控信号,更难以实施有效干扰。对空中侦察干扰设备,由于太赫兹频段能实现极窄天线波束,可以降低测控信号被侦察截获以及干扰信号进入天线主瓣的机会,极高的天线增益也抑制了从旁瓣进入的干扰。因此空基太赫兹测控系统具有良好的保密性和很强的抗干扰能力。

3 空基太赫兹测控系统实现方法

临近空间高速飞行器测控的基本要求为:外弹道测量、遥测和遥控,由于空基测控平台数量和成本等方面的限制,势必要求这些功能综合集成到一起。根据飞行器测控系统的发展趋势,宜采用测距精确度高,容易实现多目标测控和抗干扰能力强的扩频测控系统,因此空基太赫兹测控系统的基本思路是:采用扩频统一体制,在一套测控站上实现跟踪、测距、测速、遥测和遥控综合功能,配置多套测控站实现飞行器高精度外弹道测量,采用相控阵天线与码分多址实现多目标测控。

3.1 综合测控实现方法

扩频测控系统采用扩频技术实现对飞行目标的测距、测速、遥测和遥控等功能,即用时分多路来区分不同类型的测控信号,各类信号打包成帧后统一进行伪随机(Pseudorandom Noise, PN)码扩频,再对载波进行调制并送入信道传输,接收端则采用相同的码序列进行解调及相关处理,恢复原始数据。其中测距利用伪随机码实现,即利用发射和接收伪随机码信号的时间延迟来获取测控站与飞行目标之间的径向距离,其测量精确度取决于码元宽度;测速采用连续波双程相干多普勒测速技术,载波同步后从载波或伪码中提取出多普勒频移进行测速;利用码分多址来区分不同目标,实现多目标测控。扩频测控系统中,同一伪随机码可同时用作扩频码、测距码和选址码,实现一码多用。

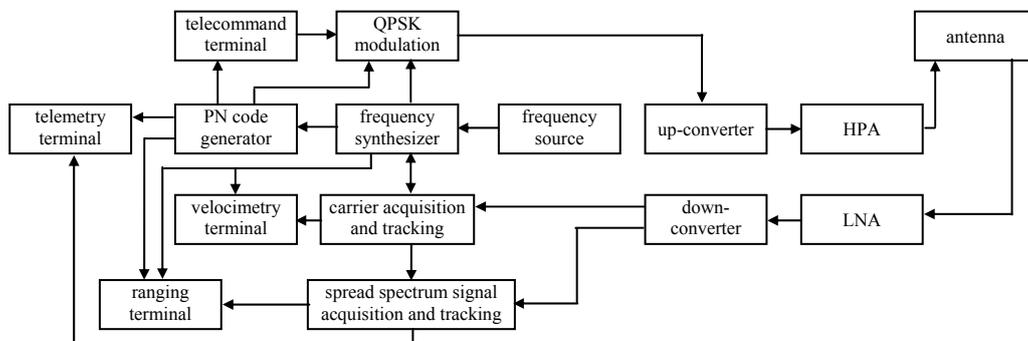


Fig.1 Configuration of the TT&C station

图 1 测控站设备组成

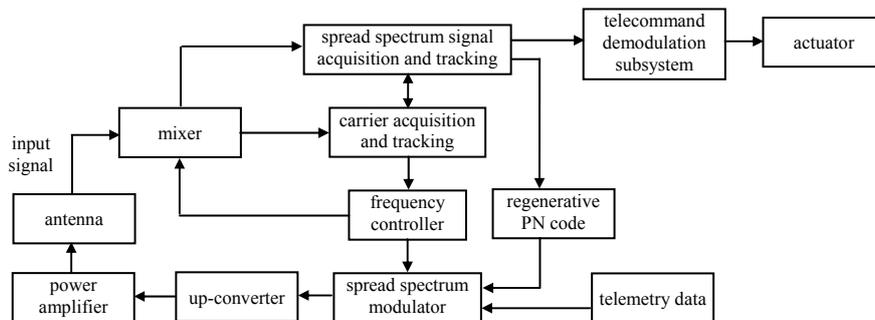


Fig.2 Configuration of the spacecraft

图 2 飞行器设备组成

空基太赫兹扩频测控系统包括空基测控站设备和飞行器设备^[7-8],空基测控站设备组成见图1,飞行器设备组成见图2,扩频功能是在其基带测量终端实现的。系统工作过程为:测控站稳定跟踪飞行器目标后,PN码产生器生成伪随机测距码与遥控指令信息进行模2加,经过脉冲成形后对中频载波进行正交相移键控(QuadriPhase Shift Keying, QPSK)调制,再通过上变频后送太赫兹发射机发射。飞行器对接收到的扩频序列信号进行捕获、跟踪和同步,对遥控信息进行解扩和解调,解调出的遥控指令送执行机构执行,同时完成测距码的捕获和跟踪,生成本地再生测距伪码,与飞行器的遥测数据进行模2加,通过QPSK调制后,经上变频和功率放大回传测控站。测控站接收到扩频信号后,对其进行捕获、跟踪和同步,对扩频遥测信息进行解扩,得到的遥测数据送遥测终端解调记录,同时完成测距码的捕获和跟踪,根据收、发测距码信号的时间延迟完成径向距离测量,并利用载波的多普勒信息获取相对速度数据。由于太赫兹频段工作频率高,相对运动产生的多普勒频率更高,在同样的频率分辨率条件下,能实现更高的速度测量精确度。

3.2 外弹道测量实现方法

临近空间高速飞行器飞行试验需要获取目标的外弹道参数 $X, Y, Z, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$,在测量精确度要求不高的情况下,可采用距离与角度(Range Azimuth and Elevation, RAE)测量体制,即由单套测控站测量距离(R)、方位角(A)和俯仰角(E),微分平滑后得到 $\dot{R}, \dot{A}, \dot{E}$ 。

高精度的外弹道测量通常由多台套雷达组成的高精度外测系统完成,这种外测系统的典型体制是中基线干涉仪,通过在飞行弹道沿线布置多台套连续波测距、测速雷达组成良好的测量几何,利用足够的测量冗余获取高精度的外弹道参数。由于空基测控平台处于运动状态,不利于采用基线干涉仪体制,可以采用测量精确度与中基线干涉仪相近的 $nR\dot{R}(n \geq 3)$ 体制^[7],这是一种纯距离及其变化率的体制,每个站都测 $R\dot{R}$,布站灵活,任务兼容能力强。其缺点是飞行器的应答机必须按频分或时分方式进行多路应答,由于太赫兹频段资源丰富,可以采用频分多路应答,即如果测控站按最低数量3套配置,飞行器的应答机需同时接收3套测控站不同频率的发射信号,经多级放大、混频和滤波形成3路中频信号,对每路信号进行扩频信号捕获,跟踪后产生各自的PN测距码,再将这3路测距码进行扩频调制后经上变频发射,各测控站接收飞行器的发射信号后解调出各自的PN测距码,完成本站与飞行器的径向距离测量,同时利用多普勒信息测量飞行器的相对速度,各测控站的测量数据经汇集后处理,获取飞行器的外弹道参数。

3.3 多目标测控实现方法

多目标测控的前提是测控站的天线能同时覆盖或快速跟踪多个飞行目标,同时覆盖多个飞行目标需要较宽的波束宽度,对发射机的功率要求很高,宜采用快速跟踪方式。受测控站平台空间有限以及机械转台扫描速度慢的制约,宜采用相控阵天线。由于太赫兹频段的辐射源功率不容易做高,可采用多组小功率太赫兹辐射源通过相控阵天线进行功率合成,实现较远的测控距离。

在测控站快速跟踪多个飞行目标的基础上,通过码分多址实现多目标测控。由于天线波束和测控信号要在不同飞行目标之间切换,测量的数据率会受到一定的限制(可根据目标的重要程度动态分配时间段),正是基于这样的考虑,飞行器的应答机宜采用按频分多路应答,以避免时分多路应答带来的有效测控时间降低。

3.4 空基测控平台选取

空基太赫兹扩频测控系统的测控平台可以选择同在临近空间区域内的平流层飞艇和高空气球,也可以采用飞行高度在10 km附近的测控飞机。采用高度在20 km以上的平流层飞艇和高空气球,可以获得较远的视距,但即使不考虑平流层飞艇和高空气球自身的复杂性,艇载/球载测控平台要实现远距离测控,设备的供电也不易解决。从技术难度的角度考虑,采用测控飞机相对容易实现。测控飞机对设备体积、重量和供电的限制较小,相控阵天线放置在机背上,有利于对临近空间目标进行快速搜索和跟踪测量。

在临近空间高速飞行器的起飞和降落段,可以采用飞行高度在10 km以下飞艇,艇载测控站的作用距离在数十 km左右,这样既可以减轻测控飞机在飞行器起飞和降落段由于视距影响所受到的限制,也可与地面测控设备相配合,加强飞行器起飞和降落段的测控。

4 工程应用分析

按照单站实现100 km~1 000 km的作用距离,初步分析空基太赫兹扩频测控系统的技术可实现性。

4.1 工作频率

根据 2.1 节的分析,要求测控系统的工作频率 $f > 283.9$ GHz,考虑艇载测控站还需要避开水汽吸收峰 325 GHz 和氧气吸收峰 369 GHz,而且随着工作频率的提高,大气传输衰减系数迅速增大,因此工作频率不宜太高,本文取工作频率为 300 GHz。

4.2 伪码长度

伪随机码具有良好的周期自相关特性,周期可设计为任意长,无模糊距离随码长增加而成比例加大,但伪码捕获时间也同样增加,对多目标测控不利,通常需要综合权衡。

码长与最大作用距离的关系式为:

$$R_{\max} = \frac{c}{2} P \Delta \quad (3)$$

式中: R_{\max} 为最大作用距离; c 为光速; P 为码长; Δ 为码元宽度。设 R_{\max} 为 1 000 km, Δ 为 $1/3 \mu\text{s}$ ^[8], 对应的码钟频率为 3 MHz, 则码长应为 2×10^4 , 取码长为 $32 \times 1\ 023 = 32\ 736$, 其对应的最大无模糊距离为 1 636 km。

4.3 发射功率

相对于机载测控站而言,临近空间高速飞行器上的设备受体积、重量和供电等方面的限制更苛刻,通常遥测的码速率较高,对发射机的功率要求也最高,因此本文重点分析遥测发射机的功率需求。

采用 QPSK 调制时, I 和 Q 通道可以分别调制经过与测距码模 2 加的奇数位和偶数位遥测信息,或者 I 和 Q 通道分别调制经过与测距码序列模 2 加的完整遥测信息。在计算遥测作用距离时,与接收系统灵敏度相关的码速率不是扩频后的码速率,而是扩频前遥测数据的码速率。

遥测分系统在自由空间传播条件下的作用距离计算公式为^[9]:

$$R^2 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 k T_n (E/\Phi_n) R_b L_1 M} \quad (4)$$

式中: R 为作用距离; P_t 为遥测发射机的发射功率; G_t 为遥测发射天线的增益,取 0 dB; G_r 为机载站接收天线的增益,取 55 dB; λ 为工作波长; k 为波尔兹曼常数; T_n 为系统噪声温度,取 200 K; E/Φ_n 为接收机输入码脉冲能量与噪声功率谱密度之比,采用 PCM/QPSK 体制,当误码率为 10^{-5} 时,则 E/Φ_n 为 13.4 dB(包含解调损耗和码分多址损耗共 4 dB); R_b 为码速率,分别取 32 kbit/s, 64 kbit/s 和 128 kbit/s; L_1 为系统损耗,取 3 dB; M 为信道裕量,取 3 dB。计算结果见图 3。

计算结果表明,即使是在遥测码速率不高的条件下,要实现 300 km 以上的作用距离,太赫兹发射机的功率要求达到 W 级,弹载设备宜选择采用微电子学技术的固态太赫兹源,其功率水平目前在 10 mW 量级^[10],离工程应用还有较大的差距。

从式(4)可以看出,同样功率条件下,作用距离与波长成正比关系,提高工作频率,解决了“黑障”难题,但由于波长缩短,带来的问题是相同功率条件下作用距离相应下降。因此,减小等离子体电子密度,从而降低测控系统的工作频率,对利用太赫兹技术实现临近空间高速飞行器测控具有重要意义。

5 结论与展望

采用飞机和飞艇为主要平台的空基太赫兹扩频测控系统,可较好解决临近空间高速飞行器测控中面临的“黑障”、超视距时空连续覆盖和多目标测控等难题,并具有对高速飞行器进行测距、测速、遥测和遥控等综合测控能力。面临的主要难题是目前太赫兹波的技术水平离工程应用还有较大差距,尤其是高功率固态太赫兹辐射源,解决途径之一是发展太赫兹辐射源功率合成技术,通过功率合成降低对单个太赫兹源的功率需求。虽然太赫兹波应用于临近空间高速飞行器测控还有漫长的路要走,但随着太赫兹技术的快速发展^[11-14],其工程应用的难点将不断被突破,相信在不太遥远的将来,太赫兹波能在测控领域得到实际应用。

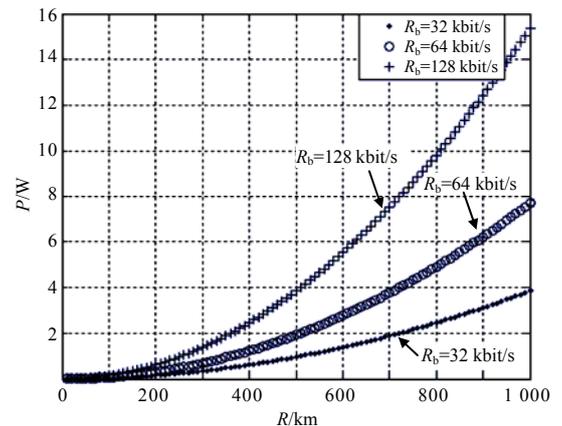


Fig.3 Power of the transmitter vs. distance under different R_b
图 3 不同码速率下,发射功率随作用距离的变化曲线

参考文献:

- [1] 李铮,赵大勇. 美国临近空间平台开发利用及对我军的启示[J]. 火力与指挥控制, 2009,34(8):1-3. (LI Zheng,ZHAO Dayong. Exploitation of American Military Near Space Platform and its Inspiration to Our[J]. Fire Control & Command Control, 2009,34(8):1-3.)
- [2] 丁一,王进,李文洲. 临近空间飞行器在防空反导预警中的运用[J]. 国防科技, 2009,30(6):21-26. (DING Yi,WANG Jin, LI Wengzhou. Application of Near Space Vehicles to the Early Warning System of Air Defence and Anti-missiles[J]. National Defense Science & Technology, 2009,30(6):21-26.)
- [3] 刘嘉兴. 临近空间飞行器测控系统的特点和主要技术问题[J]. 飞行器测控学报, 2008,27(2):1-7. (LIU Jiaying. Characteristics of TT& C System for Near Space Spacecraft[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2008,27(2):1-7.)
- [4] 钟育民,湛明,卢满宏,等. 无线电波在再入等离子体中传输的衰减模型及仿真验证[J]. 遥测遥控, 2010,31(2):1-6. (ZHONG Yumin,CHEN Ming,LU Manhong,et al. Attenuation Model and Simulation Validation of Electromagnetic Wave Transmission in Reentry Plasma[J]. Journal of Telemetry Tracking and Command, 2010,31(2):1-6.)
- [5] Yang Y,Shutler A,Grischkowsky D. Measurement of the Transmission of the Atmosphere from 0.2 to 2 THz[J]. Optics Express, 2011,19(9):8830-8838.
- [6] Krupnov A F,Golubiatnikov G Y,Markov V N,et al. Pressure Broadening of the Rotational Line of Oxygen at 425 GHz[J]. Journal of Molecular Spectroscopy, 2002,215(2):309-311.
- [7] 刘蕴才,张纪生,黄学德,等. 导弹航天测控总体[M]. 北京:国防工业出版社, 2000. (LIU Yuncai,ZHANG Jisheng,HUANG Xuede. General of Missile and Space Tracking Telemetry and Command[M]. Beijing:Publishing House of National Defence Industry, 2000.)
- [8] 李海涛,孙平. 扩频 TT& C 系统设计与分析[J]. 飞行器测控学报, 2004,23(1):58-63. (LI Haitao,SUN Ping. Analysis and Design of Spread Spectrum TT& C Systems[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2004,23(1):58-63.)
- [9] 刘蕴才,房鸿瑞,张仿. 遥测遥控系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2000. (LIU Yuncai,FANG Hongrui,ZHANG Fang. Telemetry and Telecommand System[M]. BeiJing:Publishing House of National Defence Industry, 2000.)
- [10] Radisic V,Deal W R,Leong K M K H,et al. A 10-mW Submillimeter-Wave Solid-State Power-Amplifier Module[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2010,58(7):1903-1907.
- [11] 洪伟,陈继新,严蘋蘋,等. CMOS毫米波亚毫米波集成电路研究进展[J]. 微波学报, 2010,26(4):1-6. (HONG Wei,CHEN Jixin,YAN Pinpin,et al. Research Advances in CMOS Millimeter and Submillimeter Wave Integrated Circuits[J]. Journal of Microwave, 2010,26(4):1-6.)
- [12] 崔旭东,吴卫东,唐永建. 基于合成超构材料的太赫兹调制器设计[J]. 信息与电子工程, 2011,9(3):274-276. (CUI Xudong,WU Weidong,TANG Yongjian. A design of metamaterial-based THz modulator[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(3):274-276.)
- [13] Hu Sanming,Xiong Yongzhong,Zhang Bo,et al. A SiGe BiCMOS Transmitter/Receiver Chipset With On-Chip SIW Antennas for Terahertz Applications[J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 2012,47(11):2654-2664.
- [14] Hacker J,Urteaga M,Lin R,et al. 400 GHz HBT Differential Amplifier Using Unbalanced Feed Networks[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2012,22(10):536-538.

作者简介:



宋小全(1969-),男,四川省乐山市人,博士,研究员,主要研究方向为系统工程、电子对抗、雷达信号和数据处理。

韦震(1968-),男,广西壮族自治区容县人,硕士,高级工程师,主要研究方向为微波技术.email:wcaoyu@163.com.

龙方(1972-),女,河北省遵化市人,硕士,研究员,主要研究方向为雷达信号处理。

韩中生(1978-),男,吉林省榆树市人,硕士,工程师,主要研究方向为雷达与雷达对抗。

王禹(1975-),男,辽宁省本溪市人,博士,工程师,主要研究方向为雷达技术。