

基于伪随机码调制的测距通信一体化激光雷达

张宇飞^{1,2}, 贺岩¹, 刘梦庚^{1,3}, 陈卫标¹

- (1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 上海科技大学 物质科学与技术学院, 上海 201210)

摘要: 由于自主导航等领域对激光雷达的需求, 构建了基于伪随机码调制的测距、通信一体化激光雷达。该系统具有功耗低、体积小、多功能的优点。该系统采用伪随机编码的方式, 实现了测距与通信的功能复合, 采用硅光电倍增管进行光子计数, 实现了系统的小型化。详细介绍了测距、通信一体化的设计原理、系统组成、仿真分析和实验结果。实验结果表明, 在日光条件下, 对反射率为 0.1 的目标实现了 1 km 的测距, 测距精度小于 1 m, 实现了码率为 10 kbps, 误码率小于 10^{-5} , 距离 3.7 km 的通信。

关键词: 自主导航; 伪随机码; 硅光电倍增管; 测距通信一体化; 激光雷达

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0930003

Integrated lidar of ranging and communication based on pseudorandom code modulation

Zhang Yufei^{1,2}, He Yan¹, Liu Menggeng^{1,3}, Chen Weibiao¹

- (1. Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Physical Science and Technology ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

Abstract: Be cause of the requirement of autonomous navigation, an integrated lidar of ranging and communication based on pseudorandom code modulation was proposed. The system had the advantages of low power consumption, small volume and multi-function. Adopting pseudorandom code, the lidar system realized the integration of ranging and communication. Adopting silicon photomultiplier (SiPM) to achieve photon counting realized the miniaturization of lidar system. The design principle, component, simulation, and the experiment result of the system were introduced in detail. The result shows that the maximum detection range can reach 1 km for the target with 0.1 reflectivity under daylight, and the range resolution is less than 1 m. The maximum communication range can reach 3.7 km with 10 kbps code rate and error rate less than 10^{-5} .

Key words: autonomous navigation; pseudorandom code; silicon photomultiplier; ranging and communication integration; lidar

收稿日期: 2018-04-11; 修订日期: 2018-05-14

基金项目: 创新基金(CXJJ-16M102)

作者简介: 张宇飞(1991-), 男, 博士生, 主要从事新型三维成像激光雷达技术和激光测距技术方面的研究。Email: zhangyufei@siom.ac.cn

导师简介: 贺岩(1977-), 男, 副研究员, 主要从事测距测速激光雷达和激光三维成像技术方面的研究。Email: heyang@siom.ac.cn

陈卫标(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事固体激光器技术及先进激光雷达系统等方面的研究。

Email: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

0 引言

随着社会的信息化和智能化,人们对无人驾驶汽车、无人机、智能机器人等具有自主工作能力的智能机器体的需求越来越迫切。这些智能机器体可以在多种环境下工作,不但可以做一些重复性高或是危险,人类不愿意从事的工作,也可以做一些因为尺寸限制,人类无法做的工作^[1]。在这类研究中,自主导航是一个十分重要的问题。从某种意义上来说,自主导航是智能机器体的核心技术^[2]。智能机器体有多种导航方式^[3]。其中,激光三维成像是一种主动探测方式的三维成像技术,可以全天时的获得周围环境的三维点云图像,成像范围广、抗干扰能力强、信息量大、实时性好^[4-6]。智能机器体可以根据丰富的点云数据实时获得周围情况,并根据情况完成避障、目标识别、自主寻路等功能。

传统的三维成像激光雷达虽然能够获得周围环境的三维图像,但在一些场合中,仅仅获得这些信息是不够的。例如在无人驾驶领域,两辆车交会时,虽然可以获得两辆车的距离信息,但却无法判断另一辆车是否会转弯或并道,这样是十分危险的。因此,这就要求两辆车间有一定的通信能力,相互告知即将要做的动作。再如在无人机领域,无人机不但需要对周围环境进行成像,判断自己在环境中的相对位置,还需要知道环境的绝对坐标,如经纬度信息等,若可以在成像的同时与环境中的某些特殊点进行通信,这些点将自己的位置信息反馈给无人机,无人机则可以精确的知道自己的绝对位置。此外还有很多场合都要求我们的雷达不但要有获得周围环境三维图像的能力,还要有与环境中特殊目标点交换信息的能力。由于激光测距配合光机扫描结构即可构成三维激光成像系统,是激光三维成像的核心,因此,文中建立了一种激光测距、通信一体化的激光雷达系统,用以验证这种复合型激光雷达的可行性。

1 测距、通信一体化原理

测距、通信一体化激光雷达结合了激光通信中的伪码调制技术、激光测距中的相关测距技术^[7-9]和光子计数技术。采用直接扩频的方式将通信编码加载在伪随机序列上,用调制后的序列进行相关测距,

即可获得目标的距离,而加载的通信编码则可以实现通信。采用光子计数技术则降低了系统的功耗,增加了探测距离。

伪随机序列是指:一个序列可以通过其随时间的行为来预测,因此具有确定性的本质。但这个序列又具有随机信号的某些特征,所以通常称为伪随机序列。伪随机序列具有尖锐的自相关性,但与噪声等随机序列的互相关值很小。因此,利用这个特性则可以把淹没在噪声中的信息序列位置提取出来:用原始伪随机序列与探测器接收到的回波序列进行相关运算,从激光发射到相关峰值对应的时间间隔代表了激光脉冲序列从发出到由目标反射并返回探测器的时间间隔,由此则可给出目标的距离:

$$R = \frac{c\Delta t}{2} \quad (1)$$

式中: R 为目标距离; c 为光速; Δt 为激光脉冲序列飞行时间。

为了使伪随机序列在测距的同时实现携带信息的能力,需要对原始的伪随机序列进行调制,即加载通信编码。加载方式为:保持前部分伪随机序列不变,作为捕获标志码,以实现通信信息的同步。其余部分则用直接扩频的方式将通信编码加载在伪随机序列上^[10]。

通信信号为 $c(t)$, 码元速率为 R_c , 码元宽度为 T_c , $T_c = \frac{1}{R_c}$, 则 $c(t)$ 为:

$$c(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n g_c(t - nT_c) \quad (2)$$

式中: c_n 为二进制通信编码; $g_c(t)$ 为门函数。

$$g_c(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq T_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

伪随机信号为 $a(t)$, 码元速率为 R_a , 码元宽度为 T_a , $T_a = \frac{1}{R_a}$, 则 $a(t)$ 为:

$$a(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n g_a(t - nT_a) \quad (4)$$

式中: a_n 为二进制伪随机码元; $g_a(t)$ 为门函数。

$$g_a(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq T_a \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

则最终的输出信号为:

$$d(t) = c(t) \oplus a(t) \quad (6)$$

解码的过程为:用捕获标志段的伪随机码序列

与接收到的回波序列进行实时相关运算,若有通信码回传,则相关结果会出现一个尖锐的峰值,如图 1 所示。回波能量会由于目标距离、回传角度等原因变动,相关峰值的大小也会随之变动,但无论峰值大小如何变动,其前沿都比噪声窄的多,因此采用前沿鉴别的方法来确定这个峰值位置,同时记录相关峰值大小。峰值位置即是通信码开始的位置,从该位置开始解算通信码则实现了通信码解算的同步。通信码的解算方法为:将每段原始伪随机码序列依次与各段接收回波序列进行相关运算,若大于解算阈值,则认为该位通信码为“0”,若小于解算阈值,则认为该位通信码为“1”。解算阈值大小的设定与回波的能量有关。同步捕获时记录的相关峰值的大小反应了该次通信回波能量的大小,通过该相关值即可确定解算阈值:

$$Th = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_{code}}{N_{catch}} \cdot A \quad (7)$$

式中: Th 为通信码解算阈值; N_{code} 为加载 1 bit 通信码的伪随机序列长度; N_{catch} 为捕获标志的伪随机序列长度; A 为捕获标志的相关峰值大小。

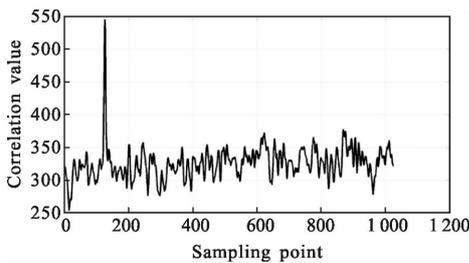


图 1 捕获标志的相关值

Fig.1 Correlation value of catch code

通过这样的编解码方式,实现了伪随机序列功能复用,同一段伪随机序列既完成了测距的功能,也实现了通信信息的交换。在实际应用中,对非合作目标可以进行测距,对合作目标(另一套雷达设备或被动应答装置)则可以同时完成测距和通信。

2 系统组成

测距、通信一体化激光雷达采用低功率发射、高灵敏度接收的技术路线。主要技术包括:伪随机码高速调制技术、单光子探测技术、光子计数技术、相关测距算法和直接扩频编解码算法。系统组成如图 2 所示,主要包括:激光发射模块、光学接收模块、单光

子探测模块和信号处理模块。

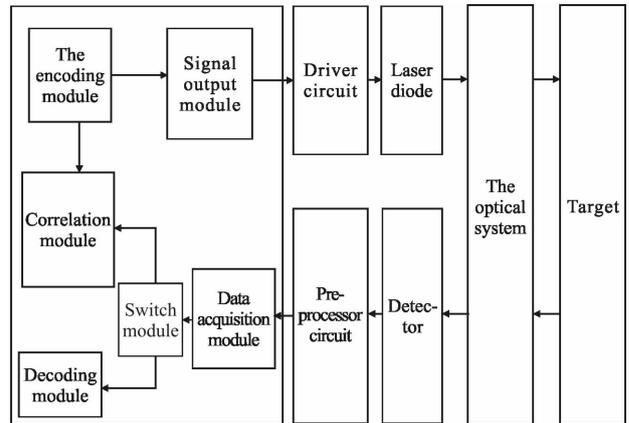


图 2 系统结构框图

Fig.2 System structure diagram

信号处理模块通过串口接收上位机发出的启动指令和通信编码,并根据上位机传下的通信编码生成加载信息编码的伪随机序列,作为激光器驱动信号。由激光器驱动电路控制激光二极管输出 OOK 调制的激光编码脉冲串。光学接收模块接收目标的回波光信号,经滤光片后输出到单光子探测器。单光子探测器将光信号转变成电信号,经 AD 采集后传给信号处理模块。信号处理模块将传来的信号分成两路同时进行距离和通信信息的反演、解算,得到目标距离和回传通信编码。最后通过串口将目标距离和回传的通信编码上传至上位机。

激光发射模块包括激光二极管、激光二极管驱动电路和激光发射光学系统。采用波长为 808 nm 激光二极管作为光源,峰值功率 350 mW。激光发射模块每 1 ms 发射一个伪随机码调制的激光脉冲串,即脉冲串的频率为 1 kHz。每个脉冲串中包含 1024 位伪随机码,调制频率为 10 MHz。激光发散角为 1 mrad。

光学系统采用收发旁轴的方式。接收口径 50 mm,滤光片带宽 1 nm,由于探测器尺寸为 1 mm×1 mm,为减小接收光学系统体积,采用双透镜组合的方式,接收视场角为 1 mrad。光路图如 3 所示。

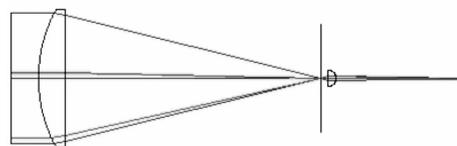


图 3 接收系统光路图

Fig.3 Diagram of receiver light path

单光子探测模块采用硅光电倍增管(SiPM),它增益高、灵敏度高、偏置电压低^[11]。在 808 nm 波段,单光子探测概率 5%,能提供极高灵敏度的探测能力。

信号处理模块由一块 FPGA 和外围电路构成。当上位机传来通信码后,每 50 bit 加载一位通信码,生成调制后的伪随机序列,发给激光器驱动电路。AD 对探测器数据进行采样,采样频率为 50 MHz, FPGA 对采集到的数据进行测距和通信的解算。

系统的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 激光雷达的技术参数

Tab.1 Specifications of lidar

Item	Specification
Wavelength/nm	808
Divergence angle/mrad	1
Receiver aperture/mm	50
Bandwidth of filter/nm	1
PN code rate/MHz	10
PN code length/bits	1 024
Laser peak power/mW	350
Detector efficiency	5%
Data updating rate/kHz	1
Communication code rate/kbps	10
Power consumption/W	≤6
Weight/g	700

3 测距、通信仿真分析

光子计数探测方式的发射和接收是建立在光子的概念上的,即要把能量和功率转化成某段时间内的光子计数。因此激光雷达作用距离方程应该改写为光子形式。大目标的激光雷达作用距离方程为:

$$E_r = \frac{\rho E_t \eta_{\text{atm}}^2 \eta_r \eta_r A_r}{\pi R^2} \quad (8)$$

由: $E = Nh\nu$, h 为普朗克常数; ν 为光频率。则光子形式的激光雷达作用距离方程为:

$$N_r = \frac{\rho N_t \eta_{\text{atm}}^2 \eta_r \eta_r A_r}{\pi R^2} \quad (9)$$

式中: N_t 为单脉冲回波光电子数; ρ 为目标反射率; N_t 为发射单脉冲光子数; η_{atm} 为单程大气透过率; η_r 为发射光学系统效率; η_r 为接收光学系统效率; A_r 为接

收面积; R 为目标距离。

回波脉冲被探测器接收转化为光电子,光电子数服从泊松分布:

$$P_{re} = \frac{(N_{re})^a}{a!} \exp(-N_{re}) \quad (10)$$

式中: P_{re} 为产生 a 个光电子的概率; N_{re} 为平均光电子数。

$$N_{re} = \eta_q N_r \quad (11)$$

式中: η_q 为探测器探测概率。

采样时间 Δt 内平均背景光子数为:

$$N_n = \frac{\frac{1}{16} \pi I_s \rho \cos(\theta_r) \cos(\theta_{\text{sun}}) D^2 \eta_{\text{sys}} \eta_{\text{atm}} \Delta \lambda \theta_r^2 \Delta t}{h\nu} \quad (12)$$

式中: I_s 为太阳光谱辐照度; ρ 为目标反射率; θ_r 为发射光轴与目标法向的夹角; θ_{sun} 为太阳光入射方向与目标法向的夹角; D 为接收口径; η_{sys} 为光学系统透过率; η_{atm} 为单程大气透过率; $\Delta \lambda$ 为滤光片带宽; θ_r 为接收视场角; Δt 为采样时间; h 为普朗克常数; ν 为光频率。

背景光电子数同样服从泊松分布,其均值为:

$$N_{ne} = \eta_q N_n \quad (13)$$

由此可知,单脉冲回波光电子数服从均值为 N_{re} 的泊松分布,背景光电子数则服从均值为 N_{ne} 的泊松分布。因此可以利用 MATLAB 软件生成均值为 N_{re} 的泊松分布序列来模拟信号回波光电子序列,生成均值为 N_{ne} 的泊松分布序列来模拟背景光电子序列。则最终回波光电子序列是两个序列的和。

用加载通信码的伪随机码序列与该模拟序列进行相关运算,即可模拟距离解算的结果,如图 4 所示。

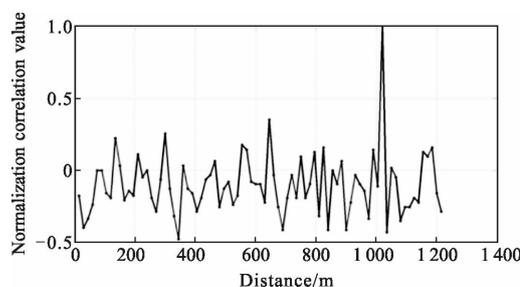


图 4 测距仿真

Fig.4 Ranging simulation

用原始伪随机序列与该模拟序列进行相关运算,即可模拟通信解算的结果,如图 5 所示。

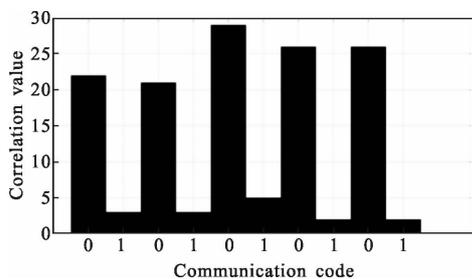


图 5 通信仿真

Fig.5 Communication simulation

仿真参数如表 2 所示。由此可以看出在当前系统参数下,可以实现 1 km 范围内的测距、通信。

表 2 仿真参数

Tab.2 Specifications of simulation

Item	Specification
Wavelength/nm	808
Divergence angle/mrad	1
Receiver aperture/mm	50
Bandwidth of filter/nm	1
Target reflectivity	0.1
Target distance/km	1
Laser peak power/mW	350
Detector efficiency	5%
Atmospheric transmissivity	70%
Solar spectrum irradiance/W·(μm·m ²) ⁻¹	790
System transmittance	35%

4 实验结果

建立了测距、通信一体化激光雷达系统,实物如图 6 所示。对系统的实际测距、通信能力进行测试。

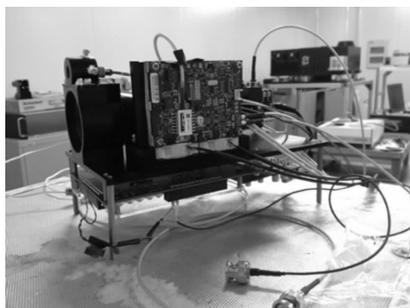


图 6 测距、通信一体化激光雷达

Fig.6 Ranging and communication lidar

在日光情况下,对 1 km 左右的目标建筑进行测距实验。50 次实际测试如图 7 所示。测距精度:0.89 m,目标距离:1 042.8 m。

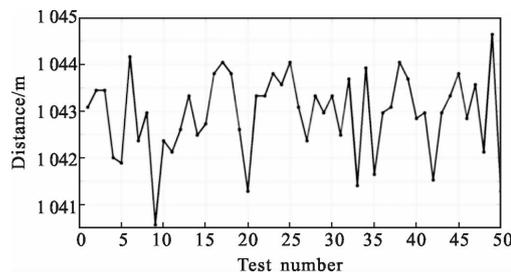


图 7 50 次测距结果

Fig.7 Result of 50 experiments

通信过程需要两套雷达系统才能完成,这里采用自发自收的形式进行验证:激光雷达发射出的信号经 80 m 处的建筑反射再回到该雷达系统进行通信解码。测试结果如表 3 所示。

表 3 通信结果

Tab.3 Result of communication

Input	Number of tests	Number of error code
0x281	2 000	0
0x205	2 000	0
0x155	2 000	0
0x138	2 000	0
0x039	2 000	0
0x2aa	2 000	0

输入不同的 10 bit 通信码,各统计 2 000 组,误码个数为 0,可算得通信误码率小于 10⁻⁵。

由建筑物反射后接收能量为:

$$E_r = \frac{\rho E_t \eta_{\text{atm}}^2 \eta_t \eta_r A_r}{\pi R_1^2} \quad (14)$$

式中: E_r 为由物体反射后回到雷达接收系统的光能量; ρ 为物体反射率; E_t 为发射能量; η_{atm} 为大气单程透过率; η_t 为发射光学系统透过率; η_r 为接收光学系统透过率; A_r 为接收面积; R_1 为反射物体到雷达的距离。

而在真实通信时,激光是直接照射在接收光学系统上的。则接收能量为:

$$E_r' = \frac{E_t \eta_{\text{atm}}' \eta_t \eta_r A_r'}{2\pi R_2^2 \sin(\theta)} \quad (15)$$

式中: E_r' 为直接照射时的接收光能量; η_{atm}' 为直接照

射时的大气单程透过率; A_r' 为接收面积; R^2 为直接照射时, 两台雷达的间距; θ 为激光发散角, 其余定义与公式(14)相同。其中, $A_r=A_r'$ 。在中等能见度条件下 $\eta_{\text{atm}}=0.98$ 。 $\theta=1$ mrad, $\rho=0.1$ 。

$$\eta_{\text{atm}}' = e^{(-\kappa R_2)} \quad (16)$$

式中: κ 为 808 nm 激光在中等能见度的情况下的大气消光比, $\kappa \approx 2.731 \times 10^{-4}$ 。

设接收能量相同, 联立公式(14)、(15)、(16)可得:

$$R_2 \approx 3.7 \times 10^3 \text{ m} \quad (17)$$

因此, 反演后的通信距离为 3.7 km。

5 结 论

采用伪随机码调制技术, 用同一串激光脉冲序列实现了测距和通信的功能复合。建立的测距、通信一体化激光雷达系统, 具有体积小、功耗低、多功能的特点。在日光条件下实现了 1 km 的测距和 3.7 km 的通信。测距精度小于 1 m, 数据输出率 1 kHz, 通信码率 10 kbps, 通信误码率小于 10^{-5} 。

参 考 文 献:

[1] Ren Fuji, Sun Xiao. Present situation and development of intelligent robot [J]. *Science & Technology Review*, 2015 (21): 32-38. (in Chinese)
任福继, 孙晓. 智能机器人的现状及发展 [J]. 科技导报, 2015(21): 32-38.

[2] Liu Haitao, Guan Shengxiao, Qin Liang, et al. Study on vision-based navigation system of intelligent-robot. [J] *Computer Applications and Software*, 2010, 27 (12): 218-220, 242. (in Chinese)
刘海涛, 关胜晓, 秦亮, 等. 智能机器人视觉导航系统的研究[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(12): 218-220, 242.

[3] Feng Jiannong, Liu Ming, Wu Jie. Survey of intelligent navigation of autonomous mobile robot [J] *Robot*, 1997(6):

69-74, 79. (in Chinese)
冯建农, 柳明, 吴捷. 自主移动机器人智能导航研究进展 [J]. 机器人, 1997(6): 69-74, 79.

[4] He Min, Hu Yihua, Zhao Nanxiang, et al. Application of airborne three-dimensional laser imaging [J] *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(4): 43-49. (in Chinese)
贺敏, 胡以华, 赵楠翔, 等. 机载激光三维成像技术应用现状[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(4): 43-49.

[5] Luo Y, He Y, Gao M, et al. Fiber laser-based scanning lidar for space rendezvous and docking [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(9): 2470-2476.

[6] Khan S A, Riza N A. Demonstration of 3-dimensional wide angle laser beam scanner using liquid crystals [J]. *Optics Express*, 2004, 12(5): 868-882.

[7] Zhang Y, He Y, Yang F, et al. Three-dimensional imaging lidar system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14 (11): 111101.

[8] Yang F, Zhang X, He Y, et al. High speed pseudorandom modulation fiber laser ranging system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(8): 082801.

[9] Yang Fang, Zhang Xin, He Yan, et al. Laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3234-3238. (in Chinese)
杨芳, 张鑫, 贺岩, 等. 采用高速伪随机码调制和光子计数技术的光纤激光测距系统 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42 (12): 3234-3238.

[10] Zhu Yongsong, Zhang Haiyong. Research on the direct sequence spread spectrum and its applications in the military [J]. *Ship Science and Technology*, 2005, 27(6): 79-81, 84. (in Chinese)
朱永松, 张海勇. 直接序列扩频通信及其军事应用研究 [J]. 舰船科学技术, 2005, 27(6): 79-81, 84.

[11] O'neill K, Dolinsky S, Jackson C, et al. Sensl new fast timing silicon photomultiplier[J]. *PoS*, 2012, 22: 1-7.