

# Modulación y Demodulación Digital de SSTV PD120

Bernardi Martín Gustavo\*, Remedi Augusto†, Rittano Ignacio‡

Universidad Nacional de Río Cuarto, Facultad de Ingeniería, Departamento de Telecomunicaciones

Río Cuarto, Córdoba, Argentina

\*martin@mbernardi.com.ar

†agustoremedi@gmail.com

‡rittanoignacio@gmail.com

**Resumen**—Se realizó una implementación de un transmisor y de un decodificador de imágenes SSTV modo PD120, utilizando SDR y Python. Nos centramos en el modo PD120 ya que se deseaba demodular imágenes transmitidas por la Estación Espacial Internacional, estas imágenes están destinadas a ser recibidas por radioaficionados. Además de demodular las transmisiones de la ISS, realizamos una transmisión entre dos equipos SDR en un ambiente de laboratorio para hacer mediciones y comparaciones en un entorno real.

## I. INTRODUCCIÓN

EL término SSTV proviene de *Slow Scan Television* es una forma de transmitir imágenes a través de un canal de banda angosta en frecuencias de audio. Se modula la imagen en un ancho de banda limitado por el usado por los transmisores de radio, luego ese transmisor modula la señal en FM para su transmisión. Hay distintas formas de codificar una imagen SSTV denominados modos, en este trabajo nos centramos en el modo PD120 ya que es el que utiliza la Estación Espacial Internacional para enviar las imágenes, pero de todas formas haremos una comparación básica entre los distintos modos para mostrar sus diferencias.

Luego se harán los cálculos correspondientes de cómo la ISS transmite sus imágenes, analizando la potencia transmitida, ganancia de las antenas, etc.

Se obtuvieron distintas imágenes transmitidas por la estación espacial mediante el uso de una antena Double-Cross y RTLSDR, y se creó un transmisor y demodulador de SSTV PD-120 utilizando Python y LimeSDR para poder realizar nuestras propias transmisiones y mediciones comparativas.

## II. SLOW SCAN TELEVISION

Es un método de transmisión de imágenes via radiocomunicación, se caracteriza por ser capaz de transmitir imágenes en canales de banda angosta y generalmente es utilizado por radioaficionados en canales de voz por VHF.

Se utiliza modulación FM analógica, en donde la señal varía su frecuencia dependiendo del brillo de cada píxel en la imagen. Existen diferentes modos que varían en resolución, tiempo de transmisión, o en la posibilidad de transmitir color. Ejemplos de modos son: Martín 1, Martín 2, Robot 24, Robot 36, PD 120, PD 90, PD 90, etc.

Para transmitir se utiliza software especializado que modula la señal SSTV en frecuencias audibles, luego la salida de audio del ordenador se conecta una radio VHF para realizar la modulación FM final para su transmisión. Para su recepción se realiza el procedimiento inverso: una radio VHF realiza la demodulación de FM, el audio demodulado ingresa a un ordenador y un programa realiza la demodulación de SSTV. Alternativamente, si se utiliza SDR en lugar de radios VHF, es necesario un ordenador y un SDR en cada extremo. Este es la implementación que utilizaremos y se puede observar en la Imagen 1.

Al comienzo de las transmisiones de SSTV, se envía un código llamado VIS (Vertical Interval Signaling), el cuál es utilizado para indicar el modo o tipo de transmisión que se va a utilizar. Para nuestro trabajo como ya sabemos el modo que vamos a enviar y recibir, no hacemos uso de este código.

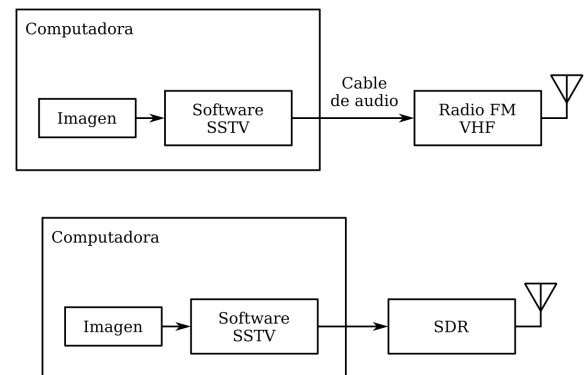


Figura 1. Esquema para la transmisión de SSTV, la recepción se realiza de la misma manera pero en sentido inverso

### II-A. Modo PD 120

Algunas características del modo PD 120 son:

- Resolución: 640x496.
- Tiempo de transmisión: 126 segundos.
- Componentes: Y, R-Y, B-Y.
- Contiene marcas de sincronización al inicio de cada línea.

En este modo, la transmisión se realiza de a dos líneas (de arriba hacia abajo), para la transmisión de cada línea se genera (ver Imagen 2):

- *Sync*: Por 20ms se envía un tono de 1200Hz.
- *Sync porch*: Por 2.08ms se envía un tono de 1500Hz.
- Componente *Y1*: Por 121.6ms se envía la luminancia de la primera línea.
- Componente *R-Y*: Por 121.6ms se envía la crominancia *R-Y*.
- Componente *B-Y*: Por 121.6ms se envía la crominancia *B-Y*.
- Componente *Y2*: Por 121.6ms se envía la luminancia de la segunda línea.

La componente *Y1* consiste de un tono cuya frecuencia varía en función de el brillo de una línea de la imagen, las frecuencias varían entre 1500Hz y 2300Hz para denotar la escala entre el color negro al blanco. En este intervalo de tiempo de 121.6 se transmite la luminancia de cada píxel de la primera línea de la imagen de izquierda a derecha, al transmitir 640 píxeles (ancho de imagen), cada píxel será transmitido por 0.190ms.

Las componentes *R-Y* y *B-Y* se llaman crominancias y pueden ser nombradas *Cr* y *Cb* respectivamente. Se transmiten de manera similar para dar color a la imagen, cada una de ellas representa a la diferencia entre la componente de color rojo y luminancia, y la componente de color azul y luminancia respectivamente. Estas componentes de color son el promedio entre los valores presentes en la primera y segunda línea de la imagen.

Finalmente se transmite *Y2* que es la luminancia de la segunda línea de la imagen. Luego el proceso se repite de manera similar para las líneas 3 y 4, 5 y 6, 7 y 8, etc. De esta forma las luminancias de las líneas se envían de a pares, mientras que las crominancias son compartidas cada dos líneas.

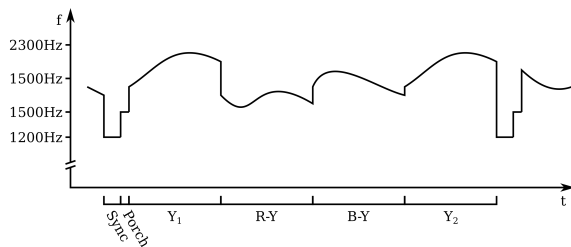


Figura 2. Gráfica representativa de una línea de una imagen codificada en PD 120

De esta manera la resolución vertical de luminancia es dos veces mayor que la resolución vertical de las crominancias, produciendo una compresión en el color de la imagen. Esta compresión disminuye el tiempo de transmisión aprovechando el hecho que los cambios de color en la imagen son menos perceptibles a la vista que los cambios en el brillo, un ejemplo de esto se puede observar en la Imagen 3.

Las frecuencias utilizadas producen una señal con un ancho de banda de 2.5kHz, esto permite que puedan utilizarse equipos diseñados para la transmisión de voz. Luego de una modulación FM, el ancho de banda es el ancho de banda de un canal VHF (entre 12.5kHz y 25kHz).

Si bien el desarrollo del trabajo es solo para el modo PD120, existen otros modos de SSTV tales como Martin, Robot,

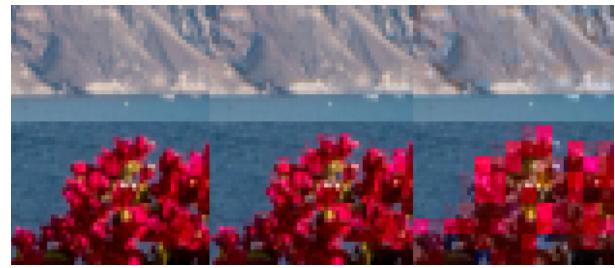


Figura 3. Degradación de la imagen debido a la compresión de color. De izquierda a derecha: Imagen original, compresión vertical 2 a 1, compresión 4 a 1 vertical y horizontal.

Scottie, entre otros, como así también hay otras variaciones del modo PD (50/90/120/160/180/240/290) los cuales su funcionamiento y formato es el mismo, pero cambian la resolución y el tiempo de transmisión.

### III. IMPLEMENTACIÓN DE MODULADOR/DEMULADOR PD 120

El dispositivo transmisor es un LimeSDR Mini mientras que el receptor es RTLSDR, como antenas utilizamos simplemente alambres ya que el receptor y transmisor estuvieron separados unos pocos metros. Para la implementación utilizamos Python y la librería SoapySDR.

#### III-A. Señales I/Q

Un concepto importante utilizado en la modulación y demodulación es la señal I/Q: además de representar la señal digital por su amplitud real en función del tiempo (I), al mismo tiempo se representa a su componente en cuadratura (Q). Esto no tiene relación con la polarización de la onda electromagnética, en su lugar se corresponde a la parte real e imaginaria de la señal analítica y representa las componentes cosenoidales y senoidales de la señal.

Los SDR trabajan con muestras I/Q ya que simplifica la modulación y demodulación, por ejemplo, es muy simple la determinación de la amplitud, fase y frecuencia de señales como las que se muestran en la Figura 4. En el caso en donde se necesite obtener una señal I/Q a partir de una señal real se puede emplear un filtro de Hilbert.

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2}$$

$$\phi = \arctan(I/Q)$$

$$f = \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

#### III-B. Modulación

Para simplificar el procedimiento, la modulación no se realiza en tiempo real, primero se generan y almacenan las muestras en un archivo para más tarde enviarlas al SDR para su transmisión. El procedimiento es el siguiente:

1. Una imagen en formato PNG es abierta y reescalada a la resolución de 640x496 necesaria para la transmisión.

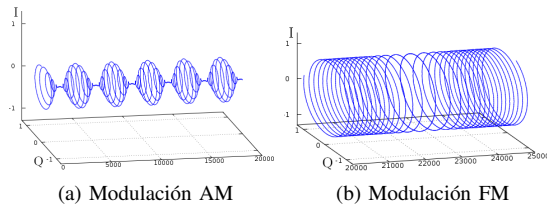


Figura 4. Ejemplos de señales I/Q. Crédito: M. Q Kuisma

2. Cada par de líneas de la imagen es procesada para obtener una señal cuya amplitud representa a la frecuencia, tal como se muestra en la Imagen 2.
3. Se genera la señal SSTV, cuya frecuencia varía dependiendo de la señal obtenida en el paso anterior.
4. La señal SSTV se modula digitalmente en FM, utilizando una tasa de muestreo de 100kHz y una frecuencia de portadora de 10kHz. Esta señal FM es compleja y en cuadratura, es almacenada en un archivo utilizando dos canales.
5. Una vez generada la señal en cuadratura, se lee el archivo en donde fue almacenada y se envían las muestras al SDR en tiempo real.
6. Previo a la transmisión, el SDR realiza un corrimiento de frecuencia, para mover la señal FM modulada a 10kHz hasta su frecuencia final (en nuestro caso, 462.538MHz)

### III-C. Demodulación

Al igual que en la modulación, la demodulación no se realiza en tiempo real, primero se obtienen las muestras desde el SDR y se almacenan en un archivo para su posterior procesamiento.

1. El SDR es sintonizado a la frecuencia de 462.538MHz, este equipo realiza un corrimiento para disminuir la frecuencia de la portadora FM a una frecuencia de banda base próxima a los 0Hz. De esta forma se reciben las muestras en cuadratura a una tasa de muestreo relativamente baja (300kHz) y se almacenan en un archivo. No se utiliza 100kHz de tasa de muestreo como en el transmisor, debido a que el RTLSDR no soporta tasa mas bajas que la utilizada.
2. Al terminar la recepción de todas las muestras en cuadratura, el archivo es abierto y se realiza una demodulación FM. Luego de un filtrado y de un remuestreo a una tasa de 10kHz se obtiene la señal SSTV lista para su procesamiento.
3. Ya que el resultado de la demodulación del paso anterior es una señal real, se utiliza un filtro FIR de Hilbert para obtener una señal en cuadratura lista para ser nuevamente demodulada.
4. Se busca obtener una señal cuya amplitud representa a la frecuencia instantánea de la señal SSTV (ver Imagen 2). Para esto se realiza demodulación FM a partir de las muestras en cuadratura, similar a la primera demodulación FM.
5. A partir de la señal de frecuencias instantáneas se buscan los comienzos de línea, es decir, valores de frecuencia instantánea de 1200Hz durante 20ms.

6. Luego de encontrar los instantes en donde se realizan saltos de línea, se toman los intervalos de la señal correspondientes a cada componente ( $Y_1$ ,  $R - Y$ ,  $B - Y$  e  $Y_2$ ) y se remuestrea cada uno de ellos para obtener un valor de frecuencia instantánea por píxel. Es decir cada componente es muestreada 640 veces, lo cual se corresponde al ancho de la imagen en píxeles.
7. Los valores de frecuencia instantánea son utilizados para obtener el valor RGB de cada píxel, necesario para almacenar la imagen en formato PNG.



Figura 5. De izquierda a derecha: imagen original, demodulación a partir de archivo sin ruido, demodulación de imagen transmitida

## IV. TRANSMISIONES DESDE ISS

La Estación Espacial Internacional transmite imágenes por SSTV en ocasiones especiales, algunos días al año, generalmente para conmemorar fechas especiales o aniversarios. Estas imágenes pueden ser recibidas libremente siempre y cuando se tenga línea de vista con la ISS, la frecuencia utilizada es de 145.8MHz, la modulación es FM con un ancho de banda de 20kHz.

La órbita de la ISS es LEO, a una altura aproximada de 400km y con una inclinación de 52°, por lo tanto es posible recibir las transmisiones en prácticamente cualquier parte del mundo siempre y cuando ésta pase sobre la estación receptora en ese momento. La pisada del satélite es de aproximadamente 4000km de diámetro.

La duración de la pasada es de como máximo 11 minutos, aunque en las pruebas realizadas observamos que es necesario al menos que la ISS tenga una elevación mayor a 10° para una buena recepción, en tal caso la duración de la pasada es como máximo 7 minutos.

Al utilizar el modo PD 120 se envían imágenes con una duración de 2 minutos. Generalmente se envían aproximadamente 12 fotos distintas, con un tiempo de espera entre ellas de 2 minutos. En cada pasada es posible recibir una o dos imágenes completas.

### IV-A. Equipamiento

El equipamiento utilizado en la Estación Espacial Internacional para la transmisión de imágenes SSTV actualmente es de:



- Computadora con el software MMSSTV.
- Radio Kenwood D700 o D710.
- Arreglo de conmutación de RF.
- Antenas de VHF.

Además de las radios Kenwood, hay otros equipos que se utilizan para otros fines como Packet Radio y voz, todos ellos tienen algunas modificaciones para cumplir con todos los estándares de seguridad requeridos en la ISS.

La salidas de las radios están conectadas a un arreglo de conmutación para seleccionar la antena a utilizar, estas antenas están ubicadas en el Módulo de Servicio *Zvezda* trabajan en HF (20m, 15m y 10m), VHF (2m), UHF (70cm), Microondas (banda L y S) y 2GHz.

Las antenas WA1, WA2 y WA3 son utilizadas para VHF, consisten de un conductor de 50cm ( $1/4\lambda$ ) y dos stubs, todo ellos contruidos con una cinta flexible. Además contienen un radomo con una espira para la banda L/S y un diplexor.

La antena WA4 es similar pero de una longitud de 2.5m, y también hay más antenas diseñadas para otras frecuencias ubicadas en el módulo Columbus. Por lo tanto para SSTV se utiliza la antena WA1, WA2 o WA3, la potencia utilizada es de 25W.



Figura 6. Radio Kenwood D700. NASA, CC BY-NC 2.0

#### IV-B. Cálculo de enlace

La potencia percibida por una estación terrena al recibir transmisiones desde la Estación Espacial Internacional depende principalmente de la distancia. Como la ISS se encuentra en un órbita LEO, la distancia depende del ángulo de elevación a la que ésta se encuentre, valores aproximados de estas distancias se encuentran en la Tabla I.

Para nuestros cálculos supondremos que el ángulo de elevación es de  $10^\circ$ , cercano al mínimo necesario para una buena recepción, en este caso la distancia es de aproximadamente 1500km. La potencia de transmisión es de 25W, las antenas utilizadas en la Estación Espacial Internacional son monopolos (ganancia 2.15dBi) y la antena utilizada para la recepción

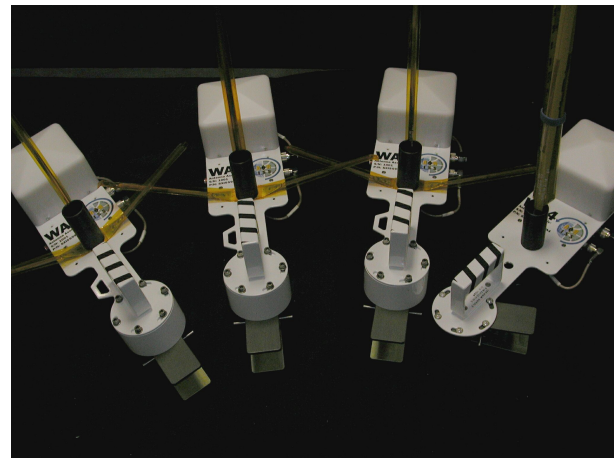


Figura 7. Antenas VHF/UHF. <http://amsat.org>



Figura 8. Foto de una de las antenas colocadas (tomada años después de su instalación). NASA, CC BY-NC 2.0

será una Double Cross con una ganancia que varía entre 0 y 2.16dBi.

Se utilizan las ecuaciones para la transmisión en el espacio libre [7], ya que la atmósfera es transparente a las frecuencias de VHF. Por ejemplo, a 500MHz y  $30^\circ$  de elevación, los efectos atmosféricos son [6]:

- Rotación de Faraday: 1.2 rotaciones. Al propagarse por la ionósfera, una onda linealmente polarizada sufre una rotación gradual de su plano de polarización.

Elevación	Distancia
$0^\circ$	2300km
$10^\circ$	1500km
$20^\circ$	1000km
$30^\circ$	770km
$45^\circ$	570km
$90^\circ$	400km

Cuadro I

DISTANCIAS APROXIMADAS A LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL EN FUNCIÓN DE LA ELEVACIÓN. CALCULADO CON EL SOFTWARE *gpredict*.

- Refracción: Menor a 2.4'.
- Absorción: Menor a 0.04dB en latitudes medias.
- Centelleo: Hasta 27.5dB. Es causado por fluctuaciones en el índice de refracción de la atmósfera.

Para realizar los cálculos en condiciones desfavorables, consideraremos al centelleo como atenuación adicional. Como la antena receptora es de polarización circular y las transmisiones presentan polarización lineal, se considera una atenuación adicional de 3dB. La ganancia de la antena transmisora depende de la orientación de la ISS, por lo tanto en los cálculos utilizamos 0dBi.

$$L_0 = 32,4 + 20\log(d[km]) + 20\log(f[MHz]) = 139,2dB$$

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_0 - 3dB - 27,5dB = -123,6dBm$$

Estos valores esperados de potencia recibida se corresponden con lo observado en nuestras pruebas, a elevaciones de 10° se percibe que nuestro SDR RTL2832U se encuentra a su límite, este equipo presenta una sensibilidad que ronda los -130dBm [8], [9].

#### IV-C. Recepción de transmisiones desde ISS

Al tratarse de valores de potencia elevados, una antena utilizada ampliamente es el dipolo en V [10], en nuestro caso utilizamos una antena Double Cross, con una polarización circular mano derecha y diseñada para 137MHz [4]. Esta antena tiene un patrón de radiación cercano al óptimo necesario para estas aplicaciones, ya que presenta buena ganancia sobre el horizonte y no presenta nulos, lo cual provocarían bandas ruidosas de corta duración en la imagen.

Esta antena consiste de cuatro dipolos de media longitud de onda inclinados 30° y separados entre ellos  $\lambda/4$ , en su alimentación, dos dipolos presentan un desfase de  $\lambda/4$ . El patrón de radiación que obtuvimos a partir de nuestras simulaciones de puede observar en la Figura 9, esta antena presenta una ganancia mayor a bajas elevaciones, lo que ayuda a compensar las atenuaciones debido a distancias mayores.

Un factor a considerar es el efecto Doppler producido por las altas velocidades a las cuales la ISS orbita la tierra, 28000km/h. La desviación de frecuencia depende de la velocidad a la cual ésta se acerca o aleja, por lo tanto dependerá de cuán directamente pase sobre nosotros, valores estándar son  $\pm 3kHz$  [11].

Para determinar en qué momentos es posible contactar la Estación Espacial Internacional es posible utilizar software que calcula los tiempos de pasada, elevación máxima, etc. Para una buena recepción recomendamos que la elevación sea mayor a 10°. En nuestro caso utilizamos el software *gpredict* y *Heavens-Above*.

#### IV-D. Resultados

Debido a que las transmisiones desde la Estación Espacial Internacional ocurren sólo determinados días al año, utilizamos una grabación propia realizada previamente. Esta grabación de la señal SSTV es el resultado de la demodulación FM realizada por GQRX.

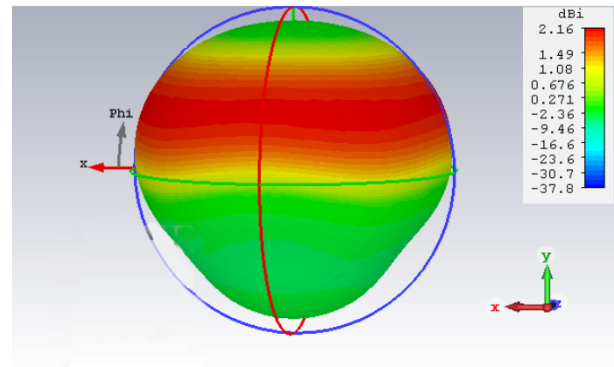


Figura 9. Diagrama de radiación teórico de antena Double Cross.

Las imágenes obtenidas a partir de la recepción del audio enviado por la ISS y posteriormente procesadas por nuestro programa se observan en la Figura 10.

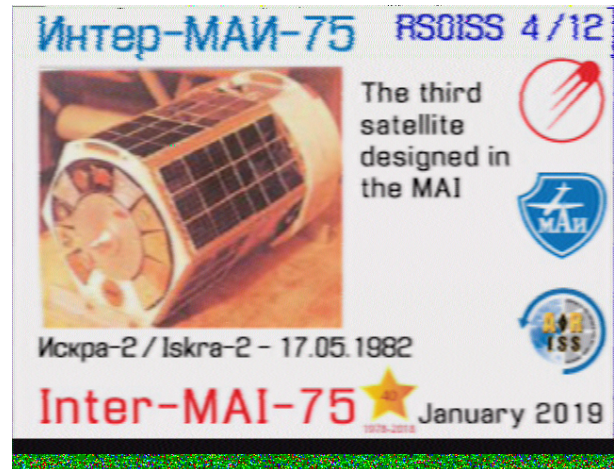


Figura 10. Imagen recibida de la ISS

## V. CONCLUSIONES

Debido a la popularidad de los sistemas SDR es una buena opción para hacer modulaciones y demodulaciones de bajo costo sin necesidad de comprar un equipo de alto costo para la recepción, esto es por el aumento de las capacidades de procesamiento. Además es muy flexible ya que se pueden hacer distintos tipos de modulaciones a distintos anchos de banda.

Analizando los resultados obtenidos, se ve que respecto de la imagen original, pierde un poco de resolución y la sincronización no es perfecta. Para mejorar el trabajo, se podría realizar un análisis de la transmisión a larga distancia, debido a que las mediciones realizadas fueron en un ambiente de laboratorio.

Como propuesta se podría diseñar un modo SSTV que use más ancho de banda, que permita enviar imágenes de mayor calidad o bien realizar la transmisión en un tiempo menor.

## REFERENCIAS

- [1] M. Bruchanov. «Image Communication on Short Waves». <http://www.sstv-handbook.com/>

- [2] F. H. Bauer, S. Samburov, L. McFadin, B. Bruninga and H. Watarikawa. «Amateur Radio on the International Space Station – Phase 2 hardware system». [http://www.termesztvilaga.hu/radiokapcsolat/ariss\\_leiras\\_angol.pdf](http://www.termesztvilaga.hu/radiokapcsolat/ariss_leiras_angol.pdf)
- [3] G. Bauer, S. Samburov. «Antennna Systems and Antenna EVA Status». <http://www.amsat.org/amsat/ariss/Meetings/CSA02/ThursApr4/AntennaSystemsEVAStatusBauerSamburov.pdf>
- [4] G. Martes. «Double Cross – A NOAA Satellite Down-link Antenna». [https://www.qsl.net/l/lu7did/docs/NOAA/DoubleCross\\_137Mhz\\_%20AntennaMARTES.pdf](https://www.qsl.net/l/lu7did/docs/NOAA/DoubleCross_137Mhz_%20AntennaMARTES.pdf)
- [5] P. Turner. «The PD SSTV modes». <http://www.classicsstv.com/pdmodes.php>
- [6] M. Arias. «Small Satellite Link Budget Calculation». [https://www.itu.int/en/ITU-R/space/workshops/2016-small-sat/Documents/Link\\_budget\\_uvigo.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-R/space/workshops/2016-small-sat/Documents/Link_budget_uvigo.pdf)
- [7] ITU-R P.525-3. «Calculation of free-space attenuation»
- [8] S. Schrödle. «R820T, RTL2832U SDR USB stick – sensitivity, dynamic range». <http://www.simonsdialogs.com/2014/09/r820t-rtl2832u-sdr-usb-stick-sensitivity-dynamic-range/>
- [9] HB9AJG. «Measurements on RTL-SDR E4000 and R820T DVB-T Dongles». <https://www.rtl-sdr.com/measurements-on-rtl-sdr-e4000-and-r820t-dvb-t-dongles-image-rejection-internal-signals-sensitivity-overload-1db-compression-intermodulation/>
- [10] «Receiving SSTV Images from the ISS with a V-Dipole and RTL-SDR». <https://www.rtl-sdr.com/receiving-sstv-images-from-the-iss-with-a-v-dipole-and-rtl-sdr/>
- [11] R. Hashiro. «Compensating for Doppler Shift When Contacting the ISS». <https://www.qsl.net/ah6rh/am-radio/spacecomm/doppler-and-the-iss.html>
- [12] M. Q. Kuisma. <http://whiteboard.ping.se/SDR/IQ>