

Análisis, simulación y comparación de gastos energéticos de la plataforma Gough-Stewart con distintos modelos de control

Enrique Benavides Téllez, Isaac Ayala Lozano y Neftali Jonatán González
Robótica y Manufactura Avanzada
CINVESTAV
Ramos Arizpe, México

Resumen—El estudio de la dinámica de la plataforma Gough-Stewart y su respectiva simulación continúan siendo un pilar en el diseño y control de este tipo de robot. Este trabajo presenta el análisis de la cinemática y dinámica de la plataforma Gough Stewart mediante el método de D'Alembert-Lagrange y su simulación para el caso de estudio de una antena parabólica y su posicionamiento.

I. Introducción

La plataforma Gough Stewart (PGS), dotada de seis grados de libertad (gdl), es uno de los manipuladores paralelos más populares. Propuesto en 1954 por Eric Gough [?] como una herramienta para pruebas en llantas de vehículos [?], fue redescubierto una década después por D. Stewart en su publicación describiendo un sistema de seis grados de libertad diseñado como un simulador de vuelo [?].

Dentro del trabajo de Stewart, el sistema se distinguió de otros simuladores de vuelo por la ausencia de un eje fijo con respecto al suelo [?]. Esta característica le ha permitido al mecanismo simular, hasta cierto límite, condiciones de vuelo y aterrizaje que otros sistemas fueron incapaces de realizar.

La plataforma Gough Stewart no se vió limitada en cuanto a sus aplicaciones. Múltiples ideas han sido propuestas por la comunidad científica y la industria. Ejemplos de esto incluye su uso como mesa estabilizadora [?], robot para cirugía, e incluso su implementación como sistema universal de pruebas para llantas [?].

Los elementos que en conjunto forman la plataforma Gough Stewart pueden agruparse en tres grupos: elementos de control, elementos de movimiento y elementos fijos. Los elementos de control consideran todo componente empleado en el robot que permita la medición de las condiciones del sistema y aquellos que están dedicados a procesar dicha información y enviar instrucciones al resto del sistema para asegurar un funcionamiento adecuado. Los elementos de movimiento incluyen todos los componentes responsables de efectuar el desplazamiento de la plataforma superior del sistema. En esta categoría se encuentran los actuadores lineales que al operar en conjunto permiten a la plataforma hacer uso de un rango de movimiento y precisión que distinguen al mecanismo.

Los elementos fijos consideran al resto de los elementos del sistema que no son responsables del movimiento o del control del mismo. El más importante de estos es la plataforma inferior, que permanece fija con el suelo y provee el soporte necesario al resto del sistema para operar.

A diferencia de otros robots, la plataforma Gough Stewart es una estructura de naturaleza paralela. Esto indica que el movimiento del elemento de interés se ve afectado simultáneamente por cada elemento impulsor del sistema y que estas aportaciones no son estudiadas en secuencia. Una estructura paralela es considerada una cadena cinemática cerrada. Cada actuador conecta al efector final con el origen con conexiones paralelas. El estudio y análisis de este comportamiento resulta más complejo que en mecanismos de naturaleza secuencial.

El estudio cinemático de un robot cualquiera se divide en el estudio de la cinemática directa o el estudio de la cinemática inversa del mismo. El estudio de la cinemática directa de un robot emplea el conocimiento de las dimensiones de sus elementos de movimiento para así predecir la posición y orientación que el efector final exhibirá. Por el contrario, la cinemática inversa hace uso de una posición y orientación conocida del efector final para determinar las dimensiones de los elementos de movimiento. Para el caso de la plataforma Gough Stewart, el estudio de la cinemática directa resulta ser un reto pues las ecuaciones de movimiento no representan un sistema lineal. Esta característica reduce considerablemente las herramientas disponibles para el análisis cinemático del sistema. Aunado a esta limitación, el estudio de la cinemática inversa del sistema es mucho más preferible.

De la misma forma, es necesario conocer el modelo dinámico del sistema. Éste define la manera en que las fuerzas y energías presentes en el sistema se comportan. La obtención de un modelo dinámico de la plataforma Gough Stewart cuenta también con sus propias complicaciones debido a su naturaleza como estructura de ciclo cerrado.

El modelo dinámico puede ser obtenido por medio de alguno de los siguientes métodos: Euler-Lagrange, principio de trabajo virtual, D'Alembert-Lagrange. Este trabajo empleará el método de D'Alembert-Lagrange para obtener el modelo dinámico de la plataforma Gough Stewart.

El objetivo de implementar una plataforma Gough Stewart es aprovechar la precisión de sus movimientos para controlar de esta manera el movimiento de un objeto de interés. El control del movimiento requiere también que el sistema sea capaz de rechazar perturbaciones y la habilidad de mantener la estabilidad de la plataforma superior aún cuando la posición de referencia esté cambiando. La teoría de control propone diferentes maneras de llegar a la estabilidad por medio de la aplicación de gradientes de energía suficientes para mantener la estabilidad en la referencia deseada.

Este trabajo presentará el estudio de la cinemática y la dinámica de la plataforma Gough Stewart. Se presentará también una comparación de diferentes estrategias de control del sistema a manera de determinar la estrategia que sea más eficiente en términos de energía.

II. Desarrollo

III. Desarrollo

III-A. Restricciones

La PGS al ser un robot de cadena cerrada obtiene limitaciones derivadas de la naturaleza del robot así como restricciones derivadas de los elementos que integran la PGS.

INSERTAR IMAGEN DEL CAD

La PGS diseñada para el proyecto cuenta con los siguientes parametros de diseño:

Parametros diseño	
Radio base	m (r_b)
Radio plataforma	m (r_a)
Separacion entre juntas (base)	m (k_b)
Separacion entre juntas (plataforma)	m (k_a)
Largo min actuador	m (q_{min})
Largo max actuador	m (q_{max})

Tabla I
Restricciones dimensionales de la PGS

Con los valores señalados previamente se determinan las restricciones dimensionales de la PGS para el desarrollo de la cinemática de la PGS.

Los primeros dos valores de la tabla III-A señalan la distancia radial en donde se deben de colocar las juntas de la plataforma (elementos pasivos). Estas juntas son las siguientes:

IMAGEN DE LA JUNTA CARDAN

Una junta universal o Cardan en la base de la PGS donde se permite la rotación en dos ejes, a fin del sistema propuesto las rotaciones en esta junta se realizan en el orden de rotación en eje y seguido de rotación en eje x .

IMAGEN DE LA JUNTA ESFERICA

Una junta esférica en la plataforma de la PGS donde se permite la rotación en tres ejes, a fin del sistema propuesto las rotaciones en esta junta se realizan en el orden de rotación en eje z , rotación en eje x finalizando en rotación en eje y .

La PGS ideal debe de tener el punto de unión de las juntas en el mismo lugar, este punto se encuentra localizado en el punto generado por el radio y una separación angular de 120° a lo largo del circulo formado por el radio. Sin embargo debido a las características de las juntas, necesitan estar separadas para realizar el seguimiento de movimiento sin generar conflictos o colisiones entre los actuadores entre la juntas de la base y plataforma. Estos valores de separación se van a utilizar para obtener el desfase angular con respecto al ángulo ideal de unión. Este desfase se calcula de la siguiente manera.

$$\alpha_a = \tan^{-1} \left(\frac{k_a}{2r_a} \right) \quad (1)$$

$$\alpha_b = \tan^{-1} \left(\frac{k_b}{2r_b} \right) \quad (2)$$

Al sumar y restar el angulo de desfase α a los ángulos ideales se obtienen los vectores de desfase angular Ψ_b y Ψ_a . Utilizando r_b , r_a , Ψ_b y Ψ_a se obtienen los puntos cartesianos de unión de la junta con la plataforma y la base de la siguiente manera:

$$b_i = \begin{bmatrix} r_b \cos(\Psi_{bi}) \\ r_b \sin(\Psi_{bi}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$a_i = \begin{bmatrix} r_a \cos(\Psi_{ai}) \\ r_a \sin(\Psi_{ai}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

III-B. Cinemática de la PGS

Para la cinemática de la PGS es importante conocer la posición y orientación del efector final, el cual es la plataforma en donde se conectan los actuadores. Se define la posición de la plataforma como un vector $d = [x, y, z]^T$ y la orientación la matriz como los ángulos medidos del referencial inercial en la forma de $\theta_p = [\psi, \theta, \phi]^T$.

III-B1. Cinemática inversa de posición: Conociendo la posición y orientación de la PGS, se puede encontrar de manera sencilla la cinemática inversa. Observando el modelo en la figura 1 buscando el valor de p_i se puede formular lo siguiente:

$$p_i = d + Ra_i = b_i + l_i \quad (5)$$

Siendo Ra_i el punto en donde se coloca la junta esferica de la plataforma, b_i el punto donde se coloca la junta Cardan, d la distancia entre el referencial inercial y el local

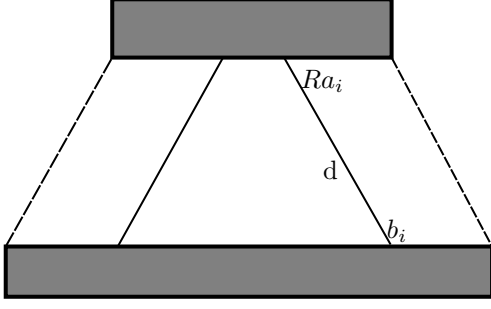


Figura 1. Diagrama de la plataforma Gough Stewart. REVISAR IMAGEN

en la plataforma. Se define R como la rotación extrínseca formada por los valores de θ_p con la siguiente forma:

$$R = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & -S_\psi C_\phi + C_\psi S_\theta S_\phi & S_\psi S_\phi + C_\psi S_\theta C_\phi \\ S_\psi C_\theta & C_\psi C_\phi + S_\psi S_\theta S_\phi & -C_\psi S_\phi + S_\psi S_\theta C_\phi \\ -S_\theta & C_\theta S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

Los movimientos de la plataforma se realizan por medio de actuadores lineales controlados por el largo del mismo. El largo del piston se define como la coordenada generalizada del sistema q_i el cual se obtiene por medio de la norma euclidea del vector de largo l_i obtenido al despejar l_i de la ecuación 5.

$$q_i = \sqrt{\langle l_i, l_i \rangle} \quad (7)$$

$$l_i = d + Ra_i - b_i \quad (8)$$

Utilizando las ecuaciones 7 y 8 se encuentra el vector unitario como:

$$\lambda_i = \frac{l_i}{q_i} \quad (9)$$

III-B2. pseudo-Cinemática Directa: Debido a la complejidad en la cinemática directa de manera tradicional, se propone dividir cada una de las cadenas paralelas partiendo del referencial inercial al referencial local de la plataforma tomando cada cadena como un robot serial. Se asignan a cada una de las juntas referenciales de movimiento rotacionales en su respectivo eje, lo cual permite desarrollar una cadena serial que puede ser definida por medio de transformaciones homogéneas.

INSERTAR IMAGEN DE LOS REFERENCIALES DE UNA PATA

$$\sum_0^1 = \begin{bmatrix} R_z(\Psi_{bi} + \pi/2) & b_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\sum_1^2 = \begin{bmatrix} R_y(\theta_{1i}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\sum_2^3 = \begin{bmatrix} R_x(\theta_{2i}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\sum_3^4 = \begin{bmatrix} I_3 & q_{min} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\sum_4^5 = \begin{bmatrix} R_z(\theta_{4i}) & l_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\sum_4^5 = \begin{bmatrix} R_x(\theta_{5i}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\sum_5^6 = \begin{bmatrix} R_y(\theta_{6i}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\sum_6^7 = \begin{bmatrix} R_z(\Psi_{ai} - \pi/2) & -Ra_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

III-B3. pseudo-Cinemática inversa: Al asignar los referenciales a las cadenas paralelas, se definen variables que dependen de valores angulares así como del valor q_i . Para el funcionamiento de esta metodología se deben de mantener las siguientes restricciones.

- Todas las cadenas paralelas deben converger en el mismo punto.
- Las cadenas al converger en el punto también deben converger en orientación.
- El único valor activo de la cadena es $q_i = \theta_{3i}$.

Para encontrar los valores articulares de las juntas, se conoce el valor de q_i y λ_i de las ecuaciones 7 y 9 de la cinemática inversa de la plataforma. El vector unitario λ_i se encuentra a lo largo del eje z del referencial \sum_1 y del referencial \sum_4 . La cadena serial en orientación se puede escribir como:

$$R(\theta_i) = R(\psi_{bi} + \pi/2)R(\theta_{1i}, \theta_{2i})R(\theta_{4i}, \theta_{5i}, \theta_{6i})R(\psi_{ai} - \pi/2) \quad (18)$$

De la misma aseveración se puede definir

$$\lambda_i^{(bi)} = R_{z, \psi_{bi} + \pi/2}^T \lambda_i^{(0)} = R_1^2 \hat{k} \quad (19)$$

Como la configuración de R_1^2 es la matriz de rotación realizada en el eje y seguido del eje x se tiene la matriz de rotación:

$$R_1^2 = \begin{bmatrix} C_{\theta_{1i}} & S_{\theta_{1i}} S_{\theta_{2i}} & S_{\theta_{1i}} C_{\theta_{2i}} \\ 0 & C_{\theta_{2i}} & -S_{\theta_{2i}} \\ -S_{\theta_{1i}} & C_{\theta_{1i}} S_{\theta_{2i}} & C_{\theta_{1i}} C_{\theta_{2i}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Y el valor de λ_i^{bi} se define:

$$\lambda_i^{(bi)} = R_{z, \psi_{bi} + \pi/2}^T \lambda_i^{(0)} = \begin{bmatrix} C_{\psi_{bi} + \pi/2} \lambda_{ix} + S_{\psi_{bi} + \pi/2} \lambda_{iy} \\ -S_{\psi_{bi} + \pi/2} \lambda_{ix} + C_{\psi_{bi} + \pi/2} \lambda_{iy} \\ \lambda_{iz} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Al reemplazar en la ecuación 19 se obtiene:

$$\lambda_i^{(bi)} = \begin{bmatrix} S_{\theta_{1i}} C_{\theta_{2i}} \\ -S_{\theta_{2i}} \\ C_{\theta_{1i}} C_{\theta_{2i}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Y de esta igualación se obtiene que:

$$\theta_{1i} = \arctan \left(\frac{C_{\psi_{bi}+\pi/2}\lambda_{ix} + S_{\psi_{bi}+\pi/2}\lambda_{iy}}{\lambda_{iz}} \right) \quad (23)$$

$$\theta_{2i} = \arcsen (S_{\psi_{bi}+\pi/2}\lambda_{ix} - C_{\psi_{bi}+\pi/2}\lambda_{iy}) \quad (24)$$

Los valores angulares de θ_{4i} , θ_{5i} y θ_{6i} se obtienen del despeje de R_4^6 de la ecuación 18:

$$R(\theta_{4i,5i,6i}) = R^T(\theta_{1i,2i}) R^T(\psi_{bi}+\pi/2) R(\theta_i) R^T(\psi_{ai}-\pi/2) \quad (25)$$

$$R(\theta_i) = R(\theta_p)$$

Donde la matriz de rotación R_4^6 se define en los ejes z , y y x de la siguiente manera:

$$Matriz Rotacion4 - 6 \quad (26)$$

Al igualar la matriz de rotación de la ecuación 26 con la matriz evaluada de la ecuación 25 se encuentran las siguientes soluciones:

$$\theta_{4i} = \arctan 2(-r_{12}, r_{22}) \quad (27)$$

$$\theta_{5i} = \arcsen(r_{32}) \quad (28)$$

$$\theta_{6i} = \arctan 2(-r_{31}, r_{33}) \quad (29)$$

III-B4. Cinemática inversa de velocidad: La cinemática inversa de velocidad se puede obtener desarrollando la derivada de la ecuación 7.

$$\frac{d}{dt}q_i = \frac{d}{dt}\sqrt{l_i^T l_i} \quad (30)$$

Desarrollamos la derivada de $||l_i||$:

$$\dot{q}_i = \frac{1}{2q_i}(\dot{l}_i \cdot l_i + l_i \cdot \dot{l}_i) = \frac{1}{q_i}(\dot{l}_i \cdot l_i) \quad (31)$$

$$\dot{q}_i = \frac{1}{q_i}(\dot{d} + [\omega \times] Ra_i) \cdot l_i \quad (32)$$

$$= \frac{1}{q_i}(v_p - [(Ra_i) \times] \omega) \cdot l_i$$

$$\dot{q}_i = \frac{l_i}{q_i}(v_p - [(Ra_i) \times] \omega) \quad (33)$$

$$= v_p \cdot \lambda_i + [(Ra_i) \times] \lambda_i \cdot \omega$$

$$\dot{q} = [\lambda_i^T, [(Ra_i) \times] \lambda_i^T] \begin{bmatrix} v_p \\ \omega \end{bmatrix} \quad (34)$$

Con la expresion de la ecuación 34 se encuentra que la forma corresponde a la forma

$$\dot{q} = A(d, R)\nu_p \quad (35)$$

Donde la matriz A es el jacobiano geométrico inverso $J_g^{(0)}$ de la plataforma desde el referencial inercial. Y mapea las velocidades de las coordenadas generalizadas al twist de la plataforma.

Al derivar la pose de la plataforma, se obtiene que el jacobiano geometrico es el que mapea los cambios de las

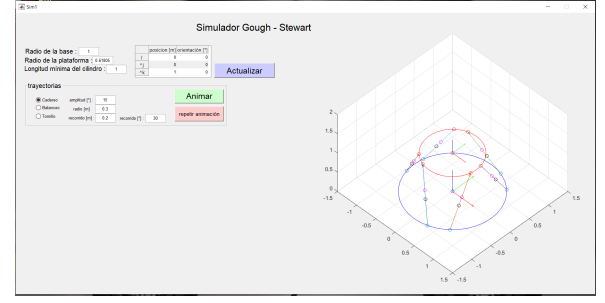


Figura 2. Interfaz gráfica del simulador.

coordenadas geeralizadas en los cambios de la pose y se define como:

$$\dot{z} = J_a(\cdot)\dot{q} \quad (36)$$

Existe una relacion entre la derivada de la pose y el twist, se encuentra que la relación entre estos dos es un operador cinemático (J_z) el cual se obtiene dependiendo de la configuración de orientación utilizada.

$$\nu_p^{(0)} = J_z \dot{z} \quad (37)$$

Al realizar la igualación de la ecuacion 35 y 36 se encuentra:

$$\dot{q} = A(d, R)^0 J_z(\theta) \dot{z} \quad (38)$$

III-B5. pseudo-Cinemática de velocidad:

IV. Simulación

El modelo cinemático desarrollado en la sección ?? fue implementado en MATLAB para evaluar el comportamiento del sistema. Este simulador es capaz de calcular los cambios en la dimensión de cada elemento de movimiento del sistema para lograr que la plataforma móvil llegue a la posición deseada.

El simulador cuenta con una interfaz gráfica que permite la evaluación de coordenadas y orientación de la plataforma. Es posible especificar posiciones deseadas y los parámetros de movimiento del robot como lo son la longitud de cada pistón y la dimensión de la base y plataforma del sistema.

El simulador determina si la posición y orientación introducidas en la interfaz gráfica es realizable con los parámetros especificados para el robot. Para llegar a este resultado, el simulador realiza las siguientes instrucciones:

- Obtener la posición de cada junta de la base, con respecto al centro de la base.
- Obtener la posición de cada junta de la plataforma móvil con respecto a la base y tomando en cuenta la posición deseada.
- Procesar las coordenadas de cada elemento para obtener los vectores que representan cada pistón.
- Evaluar si la posición deseada excede las limitaciones físicas del sistema como exceder la extensión o compresión máxima de algún pistón.

- Enviar mensajes de error si es necesario.
- Graficar los datos obtenidos, en caso de ser una posición factible.
- Ejecutar instrucciones adicionales de la interfaz gráfica.

El simulador también es capaz de producir animaciones del movimiento de la plataforma y exportarlas como archivos MP4.

V. Resultados

El proyecto ha logrado parametrizar en una medida considerable la simulación de la plataforma Gough Stewart, con lo que se vuelve fácil evaluar una infinidad de variaciones del sistema. Esta parametrización ya ha demostrado sus ventajas en la etapa de pruebas de la interfaz gráfica. La posibilidad de estudiar el comportamiento del sistema a diferentes escalas ha permitido identificar errores en el comportamiento del simulador y corregir dichos errores de manera adecuada.

VI. Discusión

El desarrollo del simulador de la plataforma Gough Stewart ha presentado diferentes retos hasta el momento. Cada uno de ellos ha servido para comprender a mayor detalle el comportamiento del robot y sus limitaciones. Cada área de conocimiento empleada exhibió sus retos únicos, como lo fue la obtención de la derivada y el determinante para la cinemática inversa de la PSG. En el área de simulación, la implementación de evaluaciones para factibilidad y la implementación de animaciones del sistema para evaluar qué tan robusto era el algoritmo desarrollado.

Los pasos que restan para el proyecto incluyen la conclusión del estudio de dinámica del sistema para la aplicación seleccionada, la cual depende de los valores obtenidos en el estudio de la cinemática directa del sistema.

VII. Conclusiones

VII-A. Neftali Jonatán González

De forma individual puedo concluir que la PGS requiere de un cambio de paradigma al momento de tener el acercamiento al problema. Regularmente se tiene un acercamiento de tipo iterativo, donde la solución de algún parámetro nos lleva a otro resultado hasta obtener la ecuación que describa el parámetro de nuestro interés, con la PGS es diferente. Requerimos de resolver el problema con cierta simultaneidad, por tal motivo el álgebra lineal es una herramienta clave, dado que se trata de una cadena cerrada.

La interpretación física de cada operación es distinta a la interpretación de las operaciones tan usadas en métodos geométricos para cadenas seriales; en ocasiones, no es tan evidente la interpretación de las operaciones vectoriales para el caso de la PGS, ha sido bastante útil el simulador para poder entender que es lo que hace cada operación y de qué forma nos acerca a la solución que deseamos.

VII-B. Enrique Benavidez Téllez

De manera personal puedo definir como resultado actual que el desarrollo de una plataforma Gough-Stewart es un proceso diferente al proceso de desarrollo de un robot serial. Debido a que se necesita desarrollar la cinemática inversa primero y en base a esta cinemática se debe de obtener la directa para poder utilizar las velocidades del efector final. Encontré que la PGS es un sistema que es fácil de resolver de manera geométrica en base a una posición y orientación requerida pero difícil con respecto al valor de las coordenadas generalizadas por la complejidad de operaciones necesarias para no caer en singularidades al moverse. El análisis dinámico de la PGS debe de llevar los valores de velocidad lineal y angular que se obtienen de la cinemática directa del sistema.

VII-C. Isaac Ayala Lozano

El proceso completo de análisis de la plataforma Gough Stewart resultó ser una actividad bastante rigurosa. La introducción de coordenadas generalizadas agregó nuevos retos al análisis. La obtención de las derivadas del sistema requirió de herramientas computacionales debido a su complejidad.

En general, la plataforma Gough Stewart y su estudio son un reto bastante interesante en cuanto a la aplicación de conocimientos de robótica. Siendo un robot paralelo, la contribución al movimiento final por cada elemento del sistema no permite ser analizado con la misma facilidad que un robot serial.

Apéndice

Se incluye como anexo los planos de la antena parabólica empleados para el estudio de la dinámica de plataforma Gough Stewart, cortesía de la compañía radiowaves¹.

¹www.radiowaves.com

SP8-2.1

2.4 M | 8 FT STANDARD PERFORMANCE PARABOLIC REFLECTOR ANTENNA, SINGLE-POLARIZED, 1.9-2.3GHZ

The SP Standard Performance Series by RadioWaves offers a full line of cost effective standard performance parabolic antennas engineered to deliver reliable radio links. Designed for both unlicensed and licensed band applications, RadioWaves field-proven pre-assembled SP antennas and robust pole-mounts ensure “set and forget” installation with minimal post-installation maintenance. If it’s rugged, it must be RadioWaves!



FEATURES AND BENEFITS

- Standard Performance Parabolic Antennas – Excellent performance for a wide range of licensed and unlicensed applications
- Fully Preassembled at the Factory – Simplifies installation on site and guarantees “factory-tested” quality
- Warranty – Industry leading 7-year warranty

SPECIFICATIONS

General

Antenna Type	Standard Performance Parabolic Reflector Antenna	Standard RF Connector Type	N-Female
Size, nominal	8 ft 2.4 m	Standard RF Connector Suffix	NS (append suffix to model number)
Polarization	Single		

Electrical

Operating Frequency Band	1.9 - 2.3 GHz	Gain, Low Frequency	30.6 dBi
Half Power Beamwidth, Horizontal	4.3 degrees	Gain, Mid Frequency	31.5 dBi
Half Power Beamwidth, Vertical	4.3 degrees	Gain, High Frequency	32.3 dBi
Cross-Polarization Discrimination	30 dB	VSWR	1.5:1
Front to Back Ratio (F/B)	39 dB	Return Loss	-14 dB

Mechanical

Fine Azimuth Adjustment	+/- 5 degrees	
Fine Elevation Adjustment	+/- 5 degrees	
Mounting Pipe Diameter, Min	4.5 inch 11.4 cm	
Mounting Pipe Diameter, Max	4.5 inch 11.4 cm	
Net Weight	165 lbs 74.3 kg	250 lbs 113.4 Kg with RD radome
Wind Velocity Operational	90 mph 145 km/h	
Wind Velocity Survival Rating	125 mph 201 km/h	

Mechanical Configuration	SP8	
Axial Force (FA)	3795 lbs 16940 N	2773 lbs 12334 Nm with RD radome
Side Force (FS)	1115 lbs 4980 N	1422 lbs 6325 Nm with RD radome
Twisting Moment (MT)	4800 ft-lbs 6508 Nm	4400 lbs 5966 Nm with RD radome
Operating Temperature Range	-40 to +60 C	
Max Pressure, PSIG, (if waveguide interface)	na	

Regulatory Compliance

FCC	undeclared
Industry Canada Compliance	SRSP302.0 D

ETSI	undeclared
RoHS-compliant	Yes

Shipping Information

Package Type	Wood Crate
Gross Weight	878 lbs 398.2 kg

Dimensions, L x W x H	102 x 60 x 91in 259 x 152 x 231 cm
Shipping Volume	322.29 cu ft 9.13 cu m

*Additional OEM interfaces and adapters may be available. Contact RadioWaves for a complete and current list of available adapters.

TECHNICAL DRAWINGS

